

SONIA MARIA ALVES COSTA

**INTEGRAÇÃO DA REDE GEODÉSICA  
BRASILEIRA AOS SISTEMAS DE  
REFERÊNCIA TERRESTRES**

Tese apresentada ao Curso de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas da Universidade Federal do Paraná para a obtenção do grau de Doutor.

Orientadores:

Prof. Dr. Marcelo Carvalho dos Santos

Prof. Dr. Camil Gemael

CURITIBA

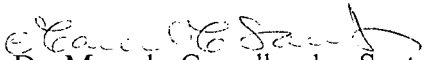
1999

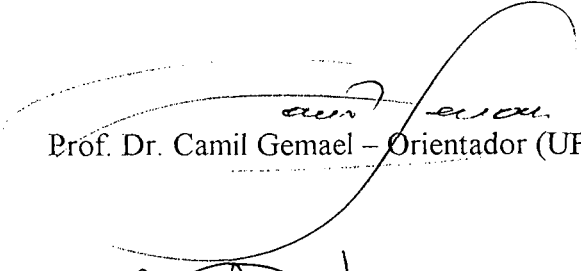
# **“INTEGRAÇÃO DA REDE GEODÉSICA BRASILEIRA AOS SISTEMAS DE REFERÊNCIA TERRESTRES”**

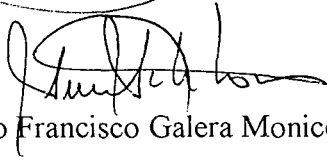
**POR**

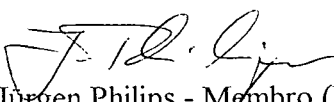
**SONIA MARIA ALVES COSTA**

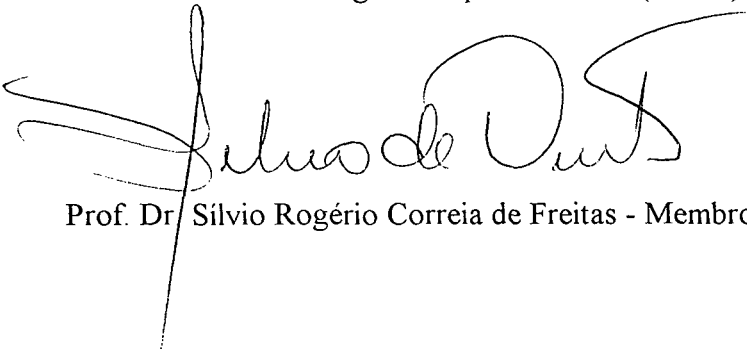
Tese nº 013 aprovada como requisito parcial do grau de Doutora no  
Curso de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas da Universidade  
Federal do Paraná, pela Comissão formada pelos professores:

  
Prof. Dr. Marcelo Carvalho dos Santos (UFPR)  
Orientadora

  
Prof. Dr. Camil Gemael – Orientador (UFPR)

  
Prof. Dr. João Francisco Galera Monico - Membro (UNESP)

  
Prof. Dr. Jürgen Philips - Membro (UFSC)

  
Prof. Dr. Silvio Rogério Correia de Freitas - Membro (UFPR)

## **DEDICATÓRIA**

Este trabalho é dedicado aos meus pais Mário e Glécia (in memorian), pelo apoio e incentivo  
que sempre foi dada a minha vida profissional;  
A minha filha Sofia ;  
e ao meu companheiro Humberto.

## AGRADECIMENTOS

O presente trabalho não teria sido possível sem a contribuição das seguintes instituições e pessoas:

- A Fundação Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), pela oportunidade e crédito, através da concessão de afastamento;
- Especificamente ao Departamento de Geodésia - IBGE, na disponibilização dos dados da RBMC e da rede planimétrica;
- A CAPES e CNPQ no apoio financeiro através da bolsa de estudos;
- Ao Convênio DAAD/CAPES, pela bolsa de estudos para o desenvolvimento do trabalho na Alemanha;
- Ao Deutsches Geodätisches Forschungsinstitut – DGFI ABT I, pelo apoio dado em todos os aspectos relativos ao trabalho desenvolvido na Alemanha;
- Aos meus orientadores Marcelo Carvalho dos Santos e Camil Gemael do CPGCG da UFPR, e aos meus orientadores na Alemanha, Hermann Drewes e Klaus Kaniuth do DGFI ABT I, pelas críticas e sugestões;
- A Markus Rothacher e Ken Hurst pelas colaborações e sugestões oportunas via e-mail;
- A Don Beattie pelo suporte técnico referente ao sistema GHOST;
- Aos meus colegas do Departamento de Geodésia do IBGE, pela colaboração no desenvolvimento deste trabalho;
- Aos meus colegas e professores do CPGCG da UFPR, pelo alegre convívio e colaboração.



## SUMÁRIO

	página
SUMÁRIO.....	v
LISTA DE FIGURAS.....	viii
LISTA DE TABELAS E GRÁFICOS.....	ix
ACRÔNIMOS.....	xi
RESUMO.....	xiii
ABSTRACT.....	xiv
 <b>CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO.....</b>	 <b>1</b>
1.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS.....	1
1.2 JUSTIFICATIVA.....	3
1.3 OBJETIVO.....	4
1.4 METODOLOGIA.....	5
 <b>CAPÍTULO 2 - CONCEITOS FUNDAMENTAIS.....</b>	 <b>8</b>
2.1 SISTEMAS DE COORDENADAS UTILIZADOS EM GEODÉSIA.....	8
2.1.1 Sistemas coordenados.....	9
2.1.2 Sistema de coordenadas curvilíneas.....	9
2.1.3 Sistema Terrestre Convencional (CTS).....	11
2.1.4 Sistema Astronômico Local (AL).....	12
2.1.5 Sistema Geodésico Local (GL).....	15
2.2 ASPECTOS CONCEITUAIS SOBRE SISTEMAS DE REFERÊNCIA TERRESTRES.....	17
2.3 EXEMPLOS DE REFERENCIAIS E SUAS MATERIALIZAÇÕES.....	20
2.3.1 WGS84.....	20
2.3.2 Definição do WGS84.....	20
2.3.3 Materialização do WGS84.....	23
2.3.4 ITRS.....	26
2.3.5 Definição do ITRS.....	27
2.3.6 Materialização do ITRS.....	27
2.3.7 Sistema SIRGAS.....	32
2.3.8 Diferenças entre WGS84, ITRF e SIRGAS.....	35
2.4 TRANSFORMAÇÕES ASSOCIADAS AOS SISTEMAS DE REFERÊNCIA TERRESTRES.....	36
2.5 IMPLICAÇÕES SOBRE A MATERIALIZAÇÃO DE UM SISTEMA DE REFERÊNCIA TERRESTRE.....	41
2.6 MÉTODOS DE INTEGRAÇÃO DE REFERENCIAIS TERRESTRES.....	43
2.7 ACURÁCIA X PRECISÃO.....	44
 <b>CAPÍTULO 3 - AJUSTAMENTO DA REDE GEODÉSICA BRASILEIRA AO SIRGAS.....</b>	 <b>48</b>
3.1 O <i>SOFTWARE</i> GHOST.....	49

3.2	MODELO MATEMÁTICO DA GEODÉSIA TRIDIMENSIONAL.....	51
3.2.1	Equações de observação para as observações terrestres.....	53
3.2.2	Equações de observação para as observações espaciais ( Doppler e GPS).....	57
3.3	PREPARAÇÃO DOS DADOS PARA O AJUSTAMENTO.....	60
3.3.1	Observações terrestres - rede clássica.....	60
3.3.2	Observações espaciais – DOPPLER e redes GPS.....	61
3.4	ESTUDO PARA A ADOÇÃO DE UM MODELO DO GEOPOTENCIAL NO AJUSTAMENTO.....	63
3.4.1	Modelo do geopotencial OSU91A.....	65
3.4.2	Modelo do geopotencial EGM96.....	66
3.4.3	Comparações e análise estatística .....	67
3.5	MÉTODO DE HELMERT BLOCKING E ESTRATÉGIA DE DIVISÃO DOS BLOCOS DE AJUSTAMENTO.....	70
3.6	RESULTADOS.....	74
3.6.1	Observações utilizadas no ajustamento.....	74
3.6.2	Incógnitas do ajustamento.....	75
3.6.3	Injunções do ajustamento.....	76
3.6.4	Análise estatística dos resultados do ajustamento.....	77
3.6.5	Estudo adicional.....	80
<b>CAPÍTULO 4 – PROCEDIMENTO DE TRANSFORMAÇÃO DE COORDENADAS ENTRE OS SISTEMAS SAD69 E SIRGAS.....</b>		<b>82</b>
4.1	DEFINIÇÃO DO SAD69.....	82
4.2	PROCEDIMENTOS DE DENSIFICAÇÃO DO SAD69 .....	85
4.3	AS REALIZAÇÕES DO SAD69.....	86
4.4	METODOLOGIA.....	89
4.5	CÁLCULO DOS PARÂMETROS DE TRANSFORMAÇÃO ENTRE SAD69 (MATERIALIZAÇÃO 1996) E SIRGAS .....	93
4.6	MODELAGEM DAS DISTORÇÕES – PROGRAMA ESTPM.....	95
4.7	TESTES E RESULTADOS .....	100
<b>CAPÍTULO 5 – ESTIMATIVA DO CAMPO DE VELOCIDADES A PARTIR DAS ESTAÇÕES DA RBMC.....</b>		<b>108</b>
5.1	MOTIVAÇÃO.....	108
5.2	MODELAGEM GEODÉSICA DA TECTÔNICA DE PLACAS.....	111
5.3	COLETA E PREPARO DOS DADOS GPS PARA O PROCESSAMENTO.....	117
5.4	ESTRATÉGIAS PARA O PROCESSAMENTO DOS DADOS GPS NO <i>SOFTWARE</i> BERNESE.....	124
5.5	COMBINAÇÃO DAS SOLUÇÕES DIÁRIAS.....	127
5.6	RESULTADOS.....	131
5.6.1	Consistência da solução GPS com o ITRF96.....	131
5.6.2	Avaliação dos resultados.....	134
5.6.3	Comparação das velocidades entre diversas fontes.....	137
5.6.4	Variação temporal nas linhas de base.....	142
5.6.5	Vetores de rotação da placa SOAM segundo estações da RBMC.....	143
<b>CAPÍTULO 6 – CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES.....</b>		<b>144</b>

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	148
ANEXO A - Exemplos da aplicação da modelagem de transformações na redução de coordenadas.....	153
ANEXO B – Principais estratégias e opções adotadas nos processamentos diários da RBMC .....	154

## LISTA DE FIGURAS

		página
FIGURA 1	Relacionamento entre os sistemas de referência utilizados no trabalho	6
FIGURA 2	Sistemas Cartesiano e Geodésico	11
FIGURA 3	Sistemas CTS e Astronômico Local	14
FIGURA 4	Sistema CTS e Geodésico Local	16
FIGURA 5	Definição do CTS WGS84	21
FIGURA 6	Rede de Referência SIRGAS	33
FIGURA 7	Transformação ativa dos vetores, no sistema CTS (o terno cartesiano Permanece fixo ; o vetor é rotacionado)	38
FIGURA 8	Transformação passiva dos vetores no sistema CTS (o terno rotacionado e o vetor permanece fixo)	39
FIGURA 9	Precisão X acurácia.	46
FIGURA 10	Rede Nacional GPS e estações SIRGAS/RBMC	63
FIGURA 11	Distribuição das estações GPS/DOPPLER conectadas ao nivelamento geométrico	69
FIGURA 12	Diagrama de divisão da rede em blocos	73
FIGURA 13	Rede Geodésica Brasileira e a divisão em blocos	77
FIGURA 14	Exemplo de distorção de tendência local	92
FIGURA 15	Isolinhas representando o deslocamento horizontal entre os sistemas de Referência SAD69 – 1996 e SIRGAS	95
FIGURA 16	Parâmetros de estimativa da média ponderada em um ponto qualquer – programa ESTPM	98
FIGURA 17	Diferenças em metros entre a materializações 1996 e 1998, Segundo espaçamentos de 30'x 30'	99
FIGURA 18	Vetores representando o deslocamento horizontal entre a materializações 1996 e1998	100
FIGURA 19	Distribuição das estações escolhidas na aplicação da modelagem de distorções	101
FIGURA 20	Relações geométricas entre as observáveis geodésicas $\bar{\Delta}x(\Delta\varphi, \Delta\lambda)$ e os parâmetros definidores do movimento da placa tectônica ( $\bar{\Omega} = \phi, \Lambda, \omega$ )	115
FIGURA 21	Relações geométricas do movimento $\Delta s$ entre duas placas tectônicas	116
FIGURA 22	Localização das estações utilizadas no processamento GPS.	118
FIGURA 23	Representação dos vetores das velocidades finais comparados com os vetores fornecidos pelo modelo NNR-NUVEL-1A e APKIM8.8.	139
FIGURA 24	Representação dos vetores das velocidades finais comparados com os vetores fornecidos pela solução RNAAC-SIR e ITRF96.	140

## LISTA DE TABELAS E GRÁFICOS

	Página
GRÁFICO 1	Distribuição estatística dos desvios padrão das coordenadas da Rede Nacional GPS
	78
GRÁFICO 2	Distribuição estatística dos desvios padrão das coordenadas de toda a rede
	79
GRÁFICO 3	Distribuição estatística da precisão das linhas de base GPS ajustadas
	80
GRÁFICO 4	Distribuição estatística da precisão das linhas de base observadas em toda a rede geodésica
	80
GRÁFICO 5	Desvio padrão das linhas de base processadas segundo latitude, longitude e altura
	135
TABELA 1	Parâmetros definidores do WGS84 e GRS80
	22
TABELA 2	Diferenças entre as versões WGS84
	25
TABELA 3	Parâmetros de transformação entre o WGS84 (original-Doppler) e WGS84 (G730), época 1988.0 e parâmetros entre WGS(G730) e ITRF92
	25
TABELA 4	Versões do ITRF e suas particularidades
	31
TABELA 5	Parâmetros de transformação do ITRF94 com relação as outras soluções ITRFyy
	31
TABELA 6	Procedimentos adotados por DGFI e NIMA para processamento da Rede SIRGAS.
	34
TABELA 7	Referenciais utilizados nas órbitas IGS
	36
TABELA 8	Ponderações adotadas para as observações da rede clássica
	61
TABELA 9	Estatística das diferenças entre as ondulações observadas e as obtidas através modelos do geopotencial OSU91A e EGM96
	69
TABELA 10	Comparação entre as altitudes ortométricas obtidas por nivelamento geométrico com as altitudes ortométricas obtidas através de GPS e ondulação geoidal ( modelo geoidal 1992 e EGM96)
	70
TABELA 11	Quantitativo das observações por bloco.
	74
TABELA 12	Quantitativos dos resultados do ajustamento
	75
TABELA 13	Parâmetros auxiliares estimados no ajustamento global
	76
TABELA 14	Valores médios dos desvios padrão das coordenadas após o reajustamento - 1996
	88
TABELA 15	Diferenças em coordenadas, segundo cada bloco de ajustamento da rede
	90
TABELA 16	Parâmetros de transformação SAD69 – 1996 e SIRGAS
	94
TABELA 17	Diferenças (em coordenadas) obtidas antes da aplicação dos parâmetros de transformação SAD69-1996 / SIRGAS e diferenças obtidas após a aplicação da transformação
	102
TABELA 18	Diferenças (em coordenadas) obtidas antes da aplicação dos parâmetros de transformação SAD69-1996 / SIRGAS e diferenças obtidas após a aplicação da transformação e modelagem de distorções no ESTPM.
	104
TABELA 19	Resultados obtidos antes e após a transformação no ESTPM
	105
TABELA 20	Vantagens e desvantagens dos procedimentos de transformação entre sistema referência terrestre
	119
TABELA 21	Resumo dos dados coletados para o ano de 1997
	120
TABELA 22	Resumo dos dados coletados para o ano de 1998
	121
TABELA 23	Resumo dos dados coletados para o ano de 1999
	121

TABELA 24	Estações que compõem a rede processada, identificação no processamento e altura da antena nas diferentes épocas (1997,3 / 1997,9 / 1998,3 / 1998,9 / 1999,2)	122
TABELA 25	Variações do centro de fase(componentes , norte, leste e altura) das antenas que participaram do processamento	123
TABELA 26	Combinação antena receptor de cada estação nas diferentes épocas (1997,3 / 1997,9 / 1998,3 / 1998,9 / 1999,2)	123
TABELA 27	Coordenadas das estações de referência em ITRF96, época 1997,0 e os correspondentes desvios padrão e velocidades	124
TABELA 28	Coordenadas das estações de referência reduzidas para cada época do processamento GPS	125
TABELA 29	Transformação de Helmert – 7 parâmetros, entre a solução combinada na época 1997,3 com ITRF96	132
TABELA 30	Transformação de Helmert – 7 parâmetros, entre a solução combinada na época 1997,9 com ITRF96	132
TABELA 31	Transformação de Helmert – 7 parâmetros, entre a solução combinada na época 1998,3 com ITRF96	133
TABELA 32	Transformação de Helmert – 7 parâmetros, entre a solução combinada na época 1998,9 com ITRF96	133
TABELA 33	Transformação de Helmert – 7 parâmetros, entre a solução combinada na época 1999,2 com ITRF96	134
TABELA 34	Desvio padrão unitário das coordenadas	135
TABELA 35	Coordenadas e respectivos desvios padrão	136
TABELA 36	Velocidades e respectivos desvios padrão	136
TABELA 37	Componentes das velocidades no sistema cartesiano, segundo os modelos de placas NNR-NUVEL-1A e APKIM8.8 e resultados fornecidos pelo DGFI na solução RNNAC SIR.	138
TABELA 38	Componentes das velocidades no sistema cartesiano, segundo soluções ITRF96 e ITRF97 e resultados fornecidos pela solução final do trabalho	138
TABELA 39	Variação das linhas de base e respectivos desvios padrão	141
TABELA 40	Comparação entre os vetores de rotação da placa SOAM, segundo modelos: NNR-NUVEL-1A, APKIM8.8 e resultados da RBMC.	142
TABELA 41	Comparação entre os parâmetros da placa SOAM, segundo modelos: NNR-NUVEL-1A, APKIM8.8 e resultados da RBMC, transformado para coordenadas esféricas.	142
TABELA 42	Efeito da mudança de coordenadas – 65 metros, em diferentes escalas do mapeamento sistemático.	146

## ACRÔNIMOS

AM0-2	Absolute Model 0
APKIM8.8	Actual Plate Kinematics Model – version 8.8
BDG	Banco de Dados Geodésicos
BIH	Bureau International de l’Heure
BTS84	BIH Terrestrial System 1984
BTS87	BIH Terrestrial System 1987
CACS	Canadian Active Control System
CDDIS	Crustal Dynamics Data Information System
CIO	Conventional International Origin
CPGCG	Curso de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas
CTRF	Conventional Terrestrial Reference Frame
CTRS	Conventional Terrestrial Reference System
DGFI	Deutsches Geodätisches Forschungsinstitut
DMA	Defense Mapping Agency
DoD	U. S. Department of Defense
DORIS	Doppler Orbitography and Radio-positioning Integrated by Satellite
ECEF	Earth-Centered Earth-Fixed
EGM96	Earth Gravity Model 1996
EOP (IERS EOP)	Earth Orientation Parameters
ERP	Earth Rotation Parameters
ESTPM	Estimation of Secondary Terrestrial Positions for Mapping
EUREF	European Reference Frame
FK5	Fifth Fundamental Catalog
GEMT2	Goddard Earth Model
GHOST	Geodetic Adjustment using Helmert Blocking of Space and Terrestrial data
GRS67	Global Reference System 1967
GRS80	Global Geodetic System 1980
GSD	Geodetic Survey Division - Canada
GSFC	NASA Goddard Space Flight Center
HAVOC	Horizontal Adjustment by Variation of Coordinates
IAG	International Association of Geodesy
IAU	International Astronomical Union
IBGE	Fundação Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
ICRS	International Celestial Reference System
IERS	International Earth Rotation Service
IERS CB	International Earth Rotation Service Central Bureau
IGS	International GPS Service
IRM	International Reference Meridian
IRP	International Reference Pole
ITRF	IERS Terrestrial Reference Frame
ITRS	IERS Terrestrial Reference System
IUGG	International Union of Geodesy and Geophysics
LLR	Lunar Laser Ranging
Mas	miliarcseconds

MVC	Matriz Variância-Covariância
NAD83	North American Datum 1983
GPS	Global Positioning System
NIMA	National Imagery and Mapping Agency
NNR-NUVEL1A	No Net Rotation – Northwestern University VELOCITY model 1A
NSWC 9Z2	Naval Surface Weapons Center
OSU91A	Potential Coefficient Model OSU91A - Ohio State University
Ppb	Partes por bilhão ( $1 : 10^9$ )
RBMC	Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo
RINEX	Receiver Independent data Exchange format
RNAAC SIR	Regional Network Associate Analysis Centers SIRGAS
SAD69	South American Datum 1969
SGB	Sistema Geodésico Brasileiro
SINEX	Software Exchange format
SIRGAS	Sistema de Referência Geocêntrico para a América do Sul
SLR	Satellite Laser Ranging
SOAM	Placa Continental Sul Americana
SSCs	Sets of Station Coordinates
TRF	Terrestrial Reference Frame
USHER	Users System for Horizontal Evaluation and Reduction
VLBI	Very Long Baseline Interferometry
WGS84	World Geodetic System 1984
WGS84 (G730)	World Geodetic System 1984 – semana GPS 730 (1994,0)
WGS84 (G873)	World Geodetic System 1984 – semana GPS 873 (1997,0)



## RESUMO

Como consequência das novas tecnologias tais como o GPS, a mudança de um sistema regional para um sistema geocêntrico produz grandes benefícios, principalmente a compatibilidade das informações no contexto internacional. O objetivo deste trabalho é estabelecer um novo referencial geodésico brasileiro, bem como desenvolver procedimentos de integração entre os referenciais internacionais (ITRF's) e nacional (SAD69). O primeiro passo dado foi a integração da Rede Geodésica Brasileira ao Sistema Geocêntrico de Referência para a América do Sul (SIRGAS), desenvolvida através de um ajustamento global e simultâneo da rede planimétrica brasileira. O Sistema SIRGAS é considerado atualmente a mais precisa materialização do ITRF na América do Sul, e é um exemplo da integração de redes regionais baseados nos produtos ITRF/IGS. Neste ajustamento foi utilizado o *software Geodetic Adjustment using Helmert Blocking of Space and Terrestrial data* (GHOST) que através da técnica de Helmert Blocking e da modelagem tridimensional é capaz de realizar ajustamentos combinados de redes GPS e clássicas, de abrangência continental.

Em um segundo passo, estes resultados são integrados às versões dos ITRF's. A implantação e operacionalização da Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo de Satélites GPS (RBMC), com 9 estações coletando dados desde 1997 (coincidentes com estações SIRGAS), fornece as informações necessárias para a integração do Sistema Geodésico Brasileiro (SGB) ao ITRF. Com este propósito, foram estimadas velocidades para as estações da RBMC. Para estimativa das velocidades foram processados no software Bernese, versão 4.0, dados GPS correspondentes a 5 épocas, compreendendo cada uma 15 dias. Em adição foram realizadas comparações entre os resultados GPS e outros modelos (geofísico – NNR-NUVEL-1A e geodésicos) de movimento de placas litosféricas.

A proposta de integração entre SAD69 e SIRGAS, é um procedimento que prevê a combinação da transformação de similaridade à técnica de modelagem de distorções provenientes da materializações dos sistemas. Entretanto algumas restrições são feitas na aplicação deste procedimento.

## ABSTRACT

As a consequence of the new technologies, such as GPS, the change from local datum to geocentric reference systems is required, in order to make the information compatible on international level. The motivation for this work is establish a new geodetic reference frame to Brasil, as well as to develop integration procedures between international systems (ITRF's) and national ones(SAD69).

To start with, a global and simultaneous adjustment of the Brazilian geodetic network into South American Geocentric Reference System (SIRGAS) was carried out. SIRGAS is considered as the most accurate realisation of ITRF in South America. It is an example of regional network integration based on ITRF/IGS products. This adjustment, was carried out using the software *Geodetic Adjustment using Helmert Blocking of Space and Terrestrial data* (GHOST), which has as main tools the Helmert Blocking technique and tridimensional modelling. It makes possible to realize combined adjustments of GPS and classical networks with continental covering.

Regarding the integration between SAD69 - realization 1996 to SIRGAS, it was developed a procedure that combines similarity transformation between two data set and a distortion model. In addition some considerations/restrictions have been done about the application of this procedure.

As a second step, these results are integrated into ITRF's versions. The establishment of the Brazilian Network for Continuous Monitoring of GPS (RBMC), with 9 stations in operation since 1997 (the same ones occupied during the SIRGAS campaign), has provided all information required for the integration of Brazilian geodetic system into ITRF. Taking this into account, it was estimated a velocity field for the RBMC stations, and some comparisons between GPS results and the global plate motion model (geophysical - recommended by the IAG, namely the NNR-NUVEL-1A and geodetic), were realized. For the estimation of velocity field, 5 epochs of GPS data comprising 15 days were processed using the software Bernese version 4.0.

## **CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO**

### **1.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS**

Desde a década de 40 foram atribuídas a Fundação Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), através do Departamento de Geodésia, as tarefas de estabelecimento e manutenção do Sistema Geodésico Brasileiro (SGB). Consta na PRP nº 22, de 21/07/83, que o “SGB é definido a partir do conjunto de pontos geodésicos implantados na porção da superfície terrestre delimitada pelas fronteiras do país, pontos estes que são determinados por procedimentos operacionais e coordenadas calculadas, segundo modelos geodésicos de precisão compatíveis com a finalidade a que se destinam”.

A Rede Planimétrica Brasileira de alta precisão é uma das “estruturas mais precisas” do SGB. Ela é atualmente, uma rede constituída por mais de 5000 estações geodésicas cujas coordenadas estão referidas ao referencial oficialmente adotado desde a década de 70, o South American Datum 1969 (SAD69).

O termo “estrutura mais precisa” é um tanto complexo se forem consideradas a evolução nos métodos e instrumentos utilizados nos levantamentos no decorrer do seu estabelecimento. Sabe-se portanto, que a precisão das coordenadas geodésicas de uma estação estabelecida por triangulação e poligonação não é melhor que 0,5 m, podendo chegar a até 1 m [IBGE, 1996]. Atualmente, através de observações a satélites do sistema Global Positioning System (GPS) utilizando-se receptores que rastreiam sinais de código e fase nas duas frequências portadoras, pode-se alcançar uma precisão centimétrica.

Durante as três décadas iniciais de implantação da rede planimétrica, foram utilizados procedimentos e instrumental considerados hoje como “clássicos” em Geodésia, sendo o que havia de mais preciso na época. Foi quando as grandes cadeias de triangulação foram estabelecidas, e a sua densificação feita através do método da poligonação. O instrumental usado na época eram teodolitos e medidores eletrônicos de distância, como por exemplo o teodolito Wild T3 e o distanciômetro AGA-600 respectivamente [IBGE,1996]. Na década de 70 foi a vez do posicionamento por satélites, considerado um dos mais precisos métodos de

levantamentos geodésicos. Inicialmente, as operações de rastreamento de satélites artificiais, eram feitas através do sistema TRANSIT. Desde 1991, o IBGE passou a adotar o GPS sistematicamente nos trabalhos geodésicos [PEREIRA, 1993].

A evolução anteriormente abordada, não está presente somente no instrumental e nos métodos de levantamentos, mas também nos métodos de ajustamento e nos sistemas de referência aos quais as coordenadas são integradas e conseqüentemente referidas. O primeiro ajustamento da rede planimétrica brasileira, foi realizado pelo método das equações de observação, sendo referido ao sistema Córrego Alegre. Nesta época, não havia ainda a disponibilidade de sistemas computacionais ou calculadoras que agilisassem os trabalhos de cálculo. O segundo ajustamento foi dividido em duas fases, ambas realizadas em sistemas computacionais. Na primeira fase, realizada pelo Defense Mapping Agency (DMA), foi utilizada o sistema computacional, denominado Horizontal Adjustment by Variation of Coordinates (HAVOC), mediante o estabelecimento do SAD69. Na segunda fase, os novos levantamentos geodésicos, provenientes da densificação da rede planimétrica, foram ajustados no programa Users System for Horizontal Evaluation and Reduction (USHER).

Em 1996 a rede planimétrica foi ajustada simultaneamente graças à utilização da técnica de Helmert Blocking [BEATTIE, 1987], disponível no sistema Geodetic Adjustment using Helmert Blocking of Space and Terrestrial data (GHOST). Neste ajustamento, foram utilizadas todas as observações da rede e os parâmetros definidores do SAD69 foram mantidos.

Com a crescente utilização do GPS nos levantamentos geodésicos, os usuários e comunidade científica internacional, estão despendendo grandes esforços na adoção de sistemas de referência geocêntricos. O sistema de navegação por satélites GPS utiliza o World Geodetic System – 1984 (WGS84) como referência. Ele é representado por um elipsóide cuja posição, orientação e dimensões que ajustam-se melhor à superfície equipotencial da Terra que coincide com o geóide global [NIMA, 1997].

Através da cooperação entre os países da América do Sul representados por suas agências nacionais e instituições internacionais, como por exemplo National Imagery and Mapping Agency (NIMA) e Deutsches Geodatisches Forschungsinstitut (DGFI ABT.I), que foi criado o projeto SIRGAS (Sistema de Referência Geocêntrico para a América do Sul) em 1993, com o principal objetivo de estabelecer um Sistema de Referência Geocêntrico para a América do Sul.

## 1.1 JUSTIFICATIVA

Diante deste quadro, a mudança de um sistema regional para um sistema geocêntrico produz grandes benefícios, principalmente quanto à compatibilidade e intercâmbio das informações de abrangência global. Outro fator que incentiva esta mudança é o fácil acesso e a precisão com que as coordenadas são obtidas por GPS, tornando esta, a técnica de posicionamento mais utilizada mundialmente.

No caso do Brasil, com a manutenção do SAD69 como referencial oficial, torna-se necessário desenvolver procedimentos de integração (conexão) com o referencial GPS. Além disso, entra-se no confronto da precisão entre os dois referenciais. Um desenvolvido especificamente para solucionar questões de mapeamento no qual a precisão métrica era requerida, e outro que em função da tecnologia proporcionada hoje em dia, fornece coordenadas de precisão centimétrica. Na prática, este problema ocorre quando um novo levantamento realizado por GPS precisa ser integrado a um levantamento existente ou a uma documentação cartográfica existente referida ao SAD69. Na maioria dos casos uma simples transformação de similaridade não soluciona o problema de conexão entre os dois referenciais. E porque não passar a adotar um sistema geocêntrico, compatível com o GPS? Este é sem dúvida o caminho mais correto, e será inevitavelmente traçado pela Geodésia no futuro.

Mediante a escolha da adoção de um sistema de referência terrestre geocêntrico, considerações adicionais devem ser feitas visando a sua manutenção. A alta precisão obtida através das técnicas espaciais de posicionamento é uma valiosa ferramenta na manutenção e acesso aos sistemas de referência terrestres. Assim dizer, a componente tempo é a quarta

componente necessária para a manutenção destes sistemas. Sendo assim, a materialização de um sistema terrestre de referência nos padrões atuais, é dado através de um conjunto de estações cujas coordenadas e velocidades são referidas a uma determinada época.

### 1.3 OBJETIVO

Este trabalho se fundamenta em um estudo visando a adoção de um sistema de referência terrestre geocêntrico, o SIRGAS, sendo este consistente com as atuais técnicas geodésicas de levantamentos, atendendo desta forma, as precisões requeridas pelos sistemas de posicionamento disponíveis atualmente (ex. GPS e GLONASS). Assim sendo, o objetivo deste trabalho consiste em explorar as várias formas de integração (ou conexão) entre sistemas de referência terrestres, sejam elas através de ajustamento de redes ou através de órbitas dos satélites GPS, considerados os métodos mais precisos de integração ou através de modelagens de transformação (transformação de similaridade), visando a integração do SGB aos sistemas de referência terrestres no contexto nacional e internacional. A começar pelo ajustamento simultâneo da Rede Geodésica Brasileira<sup>1</sup> no sistema SIRGAS, sendo este uma das mais precisas materializações do ITRF94. O SIRGAS é um exemplo de integração de uma rede regional a partir de rede global através da utilização de produtos ITRF/IGS – International GPS Service (efemérides e coordenadas).

Com os resultados do ajustamento desenvolvido neste trabalho, foram estimados parâmetros de transformação entre SIRGAS e SAD69 – materialização 1996, combinada a um procedimento de modelagem de distorções, decorrentes dos processos de materialização do antigo sistema. Com este objetivo foi utilizado o programa Estimation of Secondary Terrestrial Positions for Mapping (ESTPM) desenvolvido pelo Geodetic Survey Division – Geomatics Canada (GSD). Ele desempenha duas tarefas: a de transformar uma coordenada de um sistema em outro e modelar as distorções oriundas das materializações dos sistemas de referência.

---

<sup>1</sup> Oportunamente, a denominação de rede planimétrica foi trocada por rede geodésica já que hoje em dia são determinadas as três componentes definidoras de um ponto no espaço.

A proposta de adoção de um referencial geocêntrico e a sua caracterização dinâmica, foi a principal motivação para o desenvolvimento de um estudo geodinâmico apoiado no GPS. Estações pertencentes as redes de rastreamento contínuo por satélites GPS, como é o caso da Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo de satélites GPS (RBMC), permitem dentre outras informações, o monitoramento da variação temporal das coordenadas. O estabelecimento da RBMC, foi um passo de grande importância para a Geodésia no contexto nacional. Esta rede é atualmente composta por 10 estações, sendo 9 delas coincidentes com estações SIRGAS, fornecendo assim todas informações necessárias para a integração do SGB aos sistemas de referência terrestres adotados internacionalmente. Neste trabalho, através do processamento GPS realizado em um software científico, o Bernese, estima-se o campo de velocidades para as estações geodésicas no Brasil. Desta forma, através das velocidades associadas às coordenadas é possível efetuar a sua redução de uma época de referência  $t_0$  para a época  $t$  qualquer. Visando a validação dos resultados obtidos através da RBMC, são feitas comparações com as velocidades obtidas através de modelos geológico e geodésico da teoria de tectônica de placas, entre outras soluções geodésicas. Pretende-se comprovar que as velocidades resultantes do processamento GPS, representam uma solução confiável para a redução de coordenadas em diferentes épocas, não havendo a necessidade de se recorrer aos modelos geológicos.

#### 1.4 METODOLOGIA

O esquema da FIGURA 1 esclarece o intercâmbio entre os sistemas de referência utilizados neste trabalho, sendo o SIRGAS o ponto central. É a partir dele que soluções e metodologias serão aplicadas para sua integração ao SAD69 – materialização 1996 (apresentada no lado esquerdo da figura) e ITRFyy (apresentado no lado direito da figura). Conforme apresentado na FIGURA 1, o ajustamento combinado das redes clássica e GPS (primeira fase do trabalho), tendo como injeções as estações SIRGAS, conduz a integração do SGB ao SIRGAS. A estimativa de parâmetros de transformação combinado a análise de distorções, fornece a integração do SAD69 ao SIRGAS. A estimativa do campo de velocidades através do processamento de dados GPS obtidos da RBMC, garante a evolução temporal do sistema SIRGAS para as estações brasileiras.

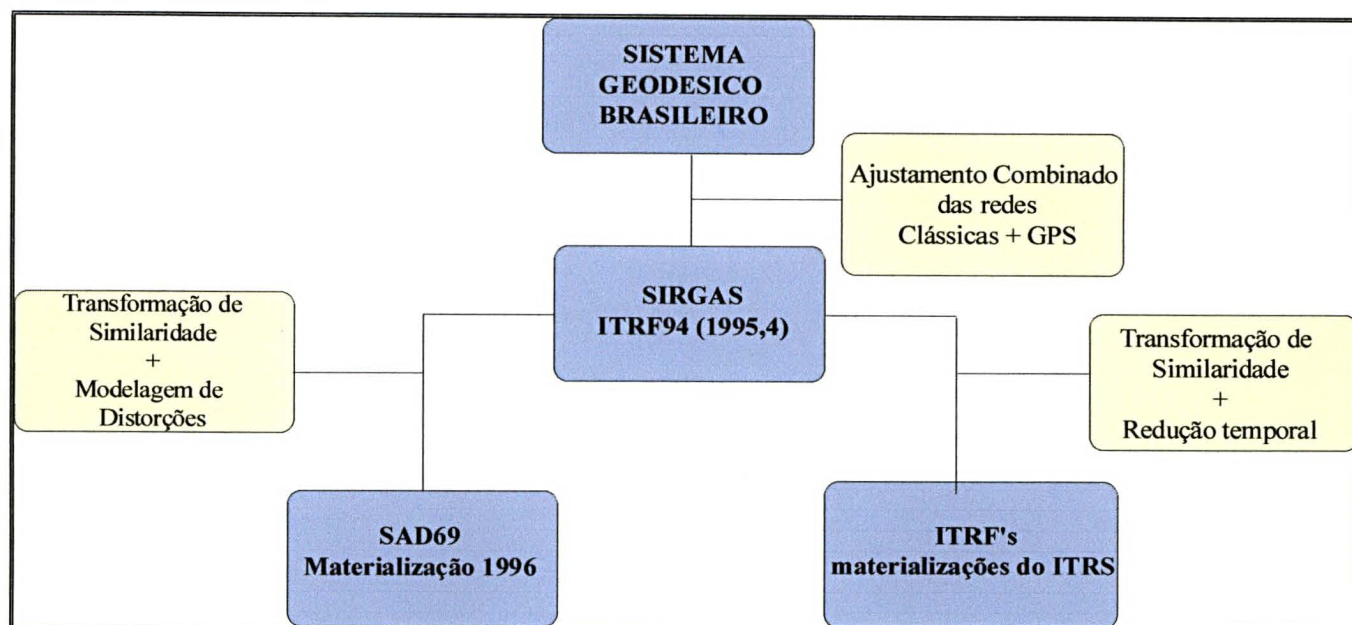


FIGURA 1 - RELACIONAMENTO ENTRE OS SISTEMAS DE REFERÊNCIA UTILIZADOS NO TRABALHO.

Para uma melhor compreensão deste trabalho o capítulo 2 é dedicado ao esclarecimento de alguns aspectos conceituais sobre o tema em pauta. São exemplificados alguns sistemas de referência atualmente em uso pela comunidade internacional; abordagens são feitas sobre as suas definições e materializações. No capítulo 3 são apresentados os resultados do ajustamento da rede geodésica brasileira no sistema SIRGAS, tais como, estimativas de erros, averiguando assim o nível de precisão atingido pelas coordenadas após o ajustamento. Foram também realizados alguns estudos comparativos entre as quantidades obtidas nos modelos do geopotencial, informações estas utilizadas como correções às observações da rede clássica no ajustamento. O capítulo 4, está dedicado à estimativa de parâmetros de transformação SAD69 e SIRGAS e ao desenvolvimento e avaliação de um procedimento que combina a transformação de similaridade a modelagem de distorções da rede. No capítulo 5 é apresentada, inicialmente, a modelagem geodésica aplicada pela teoria de tectônica de placas. Em seguida, são descritos e apresentados os resultados da estimativa dos vetores de velocidades a partir das observações GPS da RBMC e como produto derivado, a determinação de um campo de velocidades. Com o objetivo de avaliar os resultados obtidos pela RBMC, foram feitas comparações com modelos geológico e geodésico de tectônica de



placas, como por exemplo NNR-NUVEL-1A (No Net Rotation – Northwestern University VELOCITY model 1A ) [DEMELTS, 1994] e APKIM8.80 (Actual Plate Kinematics Model – version 8.8) [DREWES, 1997a], além de soluções geodésicas fornecidas pelo ITRF96 [BOUCHER et al., 1997] e RNAAC SIR (Regional Network Associate Analysis Centers SIRGAS) [SEEMÜLLER & DREWES, 1997]. No capítulo 6 serão fornecidas as conclusões das etapas realizadas neste trabalho, assim como as recomendações e algumas sugestões para trabalhos futuros.

## **CAPÍTULO 2 - CONCEITOS FUNDAMENTAIS**

Neste capítulo, faz-se uma breve revisão dos conceitos e relacionamentos entre sistemas de referência que serão usados no desenvolvimento deste trabalho, principalmente no que se refere ao melhor entendimento do modelo matemático da Geodésia tridimensional. Da mesma forma serão abordados aspectos teóricos e alguns exemplos de sistemas de referência terrestres utilizados neste trabalho e em Geodésia na atualidade.

### **2.1 SISTEMAS DE COORDENADAS UTILIZADOS EM GEODÉSIA**

Toda a informação georeferenciada, seja ela na forma analógica ou digital, é indispensável no planejamento e execução de projetos nos setores público e privado. A denominação georeferenciada implica que todas informações representadas com respeito a superfície da Terra – “geo”, estão atreladas à um sistema coordenado – “referenciadas”, que sirva como referência comum às diferentes informações, garantindo a concordância entre as suas posições. Para uso prático, portanto, existe a necessidade de correlacionar o espaço abstrato com o espaço físico [OLIVEIRA, 1998]. Deste modo, os sistemas de coordenadas que formam a base matemática das equações de observação utilizadas no contexto deste trabalho são:

- Sistema Terrestre Convencional (CTS),
- Sistema Astronômico Local (AL),
- Sistema Geodésico Local (GL),

A princípio, será feita uma abordagem mais ampla dos aspectos sobre sistemas coordenados e a sua representação através das coordenadas cartesianas e curvilíneas no espaço tridimensional - 3D, complementando-se com o seu relacionamento matemático.

### 2.1.1 Sistemas Coordenados

Define-se um sistema coordenado no espaço (bi ou tridimensional) físico e abstrato como uma relação de regras que especifica univocamente a posição de cada ponto do espaço através de um conjunto ordenado de números reais denominados coordenadas [CASTAÑEDA, 1986]. No contexto deste trabalho serão abordados exclusivamente os espaços 3D.

Um sistema coordenado cartesiano no espaço tridimensional é caracterizado por um conjunto de três retas ( $x$ ,  $y$  e  $z$ ), denominadas de eixos coordenados, mutuamente perpendiculares. Esses espaços são conhecidos por Euclidianos. Na interseção dos três eixos coordenados é localizada a origem do sistema [GSD, 1995]. Sendo assim, as coordenadas de um ponto qualquer a ser representado no espaço, são os comprimentos sobre cada eixo coordenado que vai da origem ao ponto P, projetado perpendicularmente no respectivo eixo.

Independente do método utilizado para se representar ou projetar uma determinada superfície no plano, deve-se definir um sistema coordenado que sirva de referência, garantindo uma concordância das coordenadas na superfície física da Terra. Quando se quer representar os espaços 3D através, de coordenadas esféricas, são adotados sistemas coordenados esféricos e à eles deverá estar associado um sólido geométrico, de forma e dimensões próximas a da Terra.

### 2.1.2 Sistema de coordenadas curvilíneas

As coordenadas em um espaço 3D podem ser representadas através das coordenadas cartesianas ( $X$ ,  $Y$  e  $Z$ ) ou curvilíneas ( $\phi$ ,  $\lambda$  e  $h$ ). O relacionamento matemático (FIGURA 2) do sistema de coordenadas curvilíneas e o cartesiano é dado pelas fórmulas 1, 2 e 3.

$$X = (N + h) \cos \phi \cos \lambda \quad (1)$$

$$Y = (N + h) \cos \phi \sin \lambda \quad (2)$$

$$Z = (N (1 - e^2) + h) \sin \phi \quad (3)$$

$$\text{Onde, } N^1 = a / (1 - e^2 \sin^2 \phi)^{1/2}. \quad (4)$$

Sendo,  $a$  o semi-eixo maior e  $e$  a primeira excentricidade do elipsóide.

A origem de um Sistema Cartesiano Geodésico (CG) depende da forma com que o terno cartesiano for posicionado: global ou regional (geocêntrico ou não). Um Sistema Terrestre Convencional (CTS) é uma particularização de um CG quando a origem do terno está localizada no centro de massas da Terra. O CG quando não geocêntrico é relacionado ao CTS através de parâmetros de translação e rotação. Do mesmo modo, parâmetros de translação e rotação relacionam diferentes CG.

As coordenadas curvilíneas no CG, recebem em Geodésia a denominação de coordenadas geodésicas. Normalmente a superfície elipsoidal utilizada para representar as coordenadas curvilíneas e a que mais se aproxima da forma da Terra é o elipsóide de revolução, geometricamente representado pelos seus parâmetros: semi-eixo maior ( $a$ ) e excentricidade ( $e$ ); e as coordenadas referidas a ele são denominadas de latitude ( $\phi$ ), longitude geodésicas ( $\lambda$ ) e a altitude elipsoidal ( $h$ ).

---

<sup>1</sup> raio de curvatura da seção normal contida no meridiano de P.

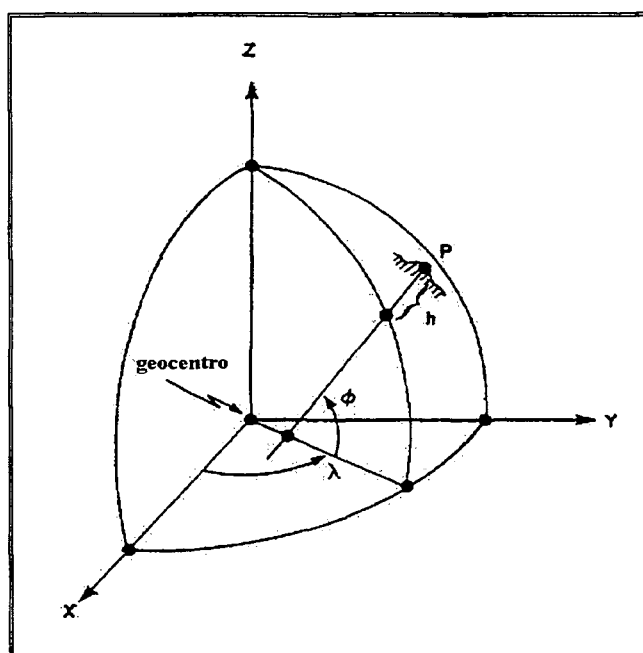


FIGURA 2 - SISTEMAS CARTESIANO E GEODÉSICO

A definição de coordenadas geodésicas de um ponto qualquer P localizado na superfície física da Terra é:

- A latitude geodésica ( $\phi$ ) é o ângulo contado sobre o meridiano que passa por P, compreendido entre a normal<sup>2</sup> passante por P e o plano equatorial.;
- A longitude geodésica ( $\lambda$ ) é o ângulo contado sobre o plano equatorial, compreendido entre o meridiano de Greenwich e o meridiano passante pelo ponto P e
- A altitude elipsoidal (h) corresponde a distância de P à superfície do elipsóide medida sobre a sua normal .

### 2.1.3 Sistema Terrestre Convencional (CTS)

O CTS é um sistema cartesiano tridimensional que tem sua origem no centro de massa da Terra (geocentro) [STEEVES, 1984]. Ele é o sistema de referência mais utilizado em Geodésia pelos sistemas espaciais de posicionamento baseado em satélites artificiais. Define-se um CTS por:

- O plano XZ contém o meridiano médio de Greenwich;

<sup>2</sup> Reta perpendicular a superfície do elipsóide em P.

- O eixo Z é coincidente com o CIO<sup>3</sup> (Conventional International Origin) e é positivo na direção norte;
- O eixo Y é perpendicular aos eixos X e Z, formando um sistema de polaridade dextrógira<sup>4</sup>.

Um CTS, quando associado à constantes geométricas e físicas do campo gravitacional terrestre recebe a denominação de Sistema Geodésico de Referência (SGR). Com este propósito, o desenvolvimento da Geodésia Espacial possibilitou qualificar a definição dos SGR e complementou suas características geográficas com atributos físicos do comportamento do campo gravitacional terrestre. Esses sistemas internacionais de referência, conhecidos na literatura por “GRS” (ex: DGFI, 1998a e NIMA, 1997) possuem as principais características:

- A massa elipsoidal é equivalente à massa da Terra;
- A velocidade angular de rotação do elipsóide é igual à da Terra;
- A origem do sistema cartesiano corresponde ao centro de massas da Terra;
- eixo Z do sistema cartesiano, coincide com o eixo de rotação da Terra.

Estas condições fazem com que um SGR não seja definido somente pelo raio equatorial e pelo achatamento do elipsóide, mais também por quantidades físicas. Um exemplo é o GRS80 (Geodetic Reference System 1980) recomendado pela Associação Internacional de Geodésica (IAG) em 1980 [TORGE, 1996]. As constantes que definem o GRS80 são apresentadas na TABELA 1.

#### 2.1.4 Sistema Astronômico Local (AL)

Os próximos dois sistemas de coordenadas a serem abordados são sistemas topocêntricos. Por topocêntrico entende-se um sistema com sua origem coincidente com um ponto P qualquer na superfície terrestre. Este sistema era utilizado no posicionamento e

<sup>3</sup> A posição média do eixo de rotação durante o período de 1900-1905.

<sup>4</sup> Entende-se por polaridade de um sistema coordenado o sentido em que o eixo X é rotacionado ao Y. A polaridade é destrógira se o sentido for anti-horário e levógira no sentido horário.

orientação dos referenciais geodésicos horizontais antes do posicionamento a satélites, quando as coordenadas geocêntricas não eram possíveis de ser obtidas [VANICEK e STEEVES, 1996]. Algumas bibliografias denominam este sistema de “sistema de coordenadas naturais”, devido ao seu relacionamento com certas características físicas da Terra, como por exemplo o campo da gravidade terrestre. Deste modo, a vertical do ponto P (localizado na superfície terrestre) é coincidente com o vetor gravidade e perpendicular à superfície equipotencial<sup>5</sup> em P. O sistema AL é então definido pelo vetor gravidade e pelo eixo de rotação da Terra [VANICEK e KRAKIWSKY, 1986]. Representado pelas suas coordenadas cartesianas ( $w$ ,  $u$  e  $v$ ), ele é definido da seguinte forma:

- eixo  $w$  (terciário) do AL é coincidente com o vetor gravidade no ponto P e positivo no sentido oposto ao do vetor gravidade;
- O eixo  $u$  do AL aponta para o norte astronômico e o eixo  $v$  aponta para o leste astronômico. O plano primário do sistema é perpendicular ao vetor gravidade em qualquer ponto da superfície e recebe a denominação de plano do horizonte (plano primário);
- O plano secundário corresponde ao meridiano astronômico de P;
- A polaridade deste sistema é levógira.

O relacionamento do sistema AL com o sistema CTS é ilustrado na FIGURA 3. As coordenadas curvilíneas associadas ao AL são as latitude e longitude astronômicas ( $\Phi$ ,  $\Lambda$ ), corrigidas do movimento do pólo, isto é reduzidas ao CIO. Define-se por latitude astronômica o ângulo entre a vertical em P e o plano equatorial, medido sobre meridiano astronômico e passante por P. Seu valor é negativo para pontos situados no hemisfério sul e positivo para pontos situados no hemisfério norte. A longitude astronômica é o ângulo diedro formado pelo meridiano em P e o meridiano astronômico (médio) de Greenwich. O sinal será positivo ou negativo conforme P se encontre a leste ou a oeste de Greenwich. O posicionamento de P no espaço 3D se completa através da altitude ortométrica ( $H$ ), sendo definida como distância contada sobre a linha vertical passante por P, entre o geóide e a superfície terrestre. As equações (5) e (6) relacionam o sistema AL com o CTS.

---

<sup>5</sup> Superfície de mesmo potencial em todos os pontos

Sejam as coordenadas do ponto 1 (origem do referencial local), representadas em um AL pela latitude e longitude astronômica ( $\Phi_1$  e  $\Lambda_1$ ), e as coordenadas AL de um segundo ponto 2 ( $u_2, v_2, w_2$ ). O relacionamento das coordenadas AL com as diferenças de coordenadas  $\Delta X, \Delta Y$  e  $\Delta Z$  ( $\Delta X = X_2 - X_1, \Delta Y = Y_2 - Y_1$  e  $\Delta Z = Z_2 - Z_1$ ) é dado por [STEEVES, 1984]:

$$\begin{bmatrix} u_2 \\ v_2 \\ w_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\sin \Phi_1 \cos \Lambda_1 & -\sin \Phi_1 \sin \Lambda_1 & \cos \Phi_1 \\ -\sin \Lambda_1 & \cos \Lambda_1 & 0 \\ \cos \Phi_1 \cos \Lambda_1 & \cos \Phi_1 \sin \Lambda_1 & \sin \Phi_1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta X \\ \Delta Y \\ \Delta Z \end{bmatrix} \quad (5)$$

$$\text{Se } R_{A1} = \begin{bmatrix} -\sin \Phi_1 \cos \Lambda_1 & -\sin \Phi_1 \sin \Lambda_1 & \cos \Phi_1 \\ -\sin \Lambda_1 & \cos \Lambda_1 & 0 \\ \cos \Phi_1 \cos \Lambda_1 & \cos \Phi_1 \sin \Lambda_1 & \sin \Phi_1 \end{bmatrix}, \text{ então } \begin{bmatrix} u_2 \\ v_2 \\ w_2 \end{bmatrix} = R_{A1} \begin{bmatrix} \Delta X \\ \Delta Y \\ \Delta Z \end{bmatrix} \quad (6)$$

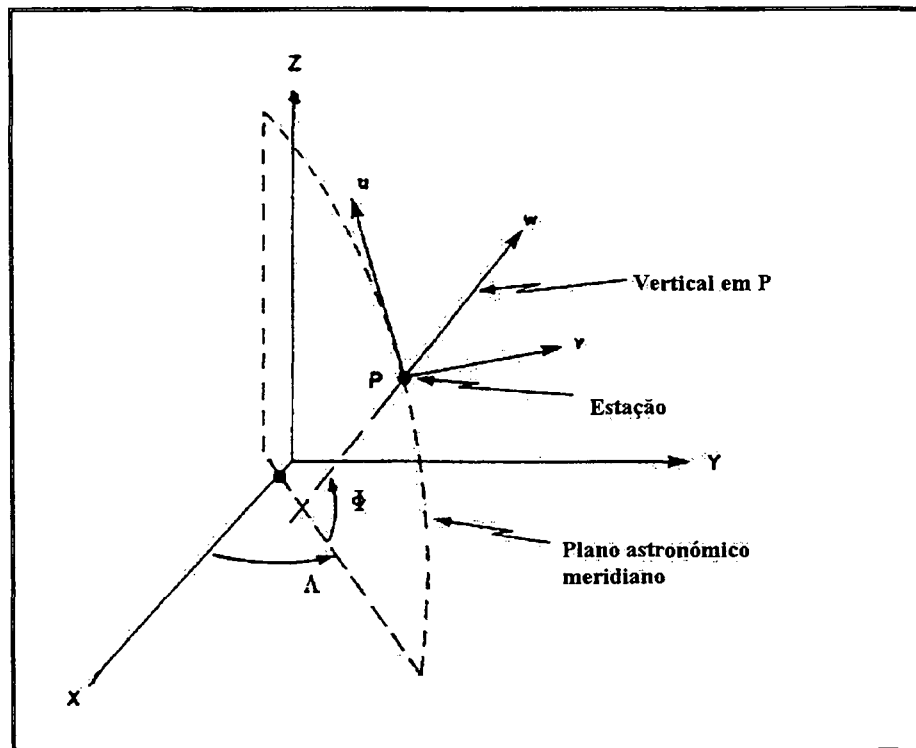


FIGURA 3 - SISTEMAS CTS E ASTRONÔMICO LOCAL

Todas observações geodésicas terrestres, tais como medidas de distâncias (S), ângulos horizontais (m) e azimutes (A), são as coordenadas esféricas associadas a este sistema [CASTAÑEDA, 1986]. As equações de observação associada a cada tipo de observação são

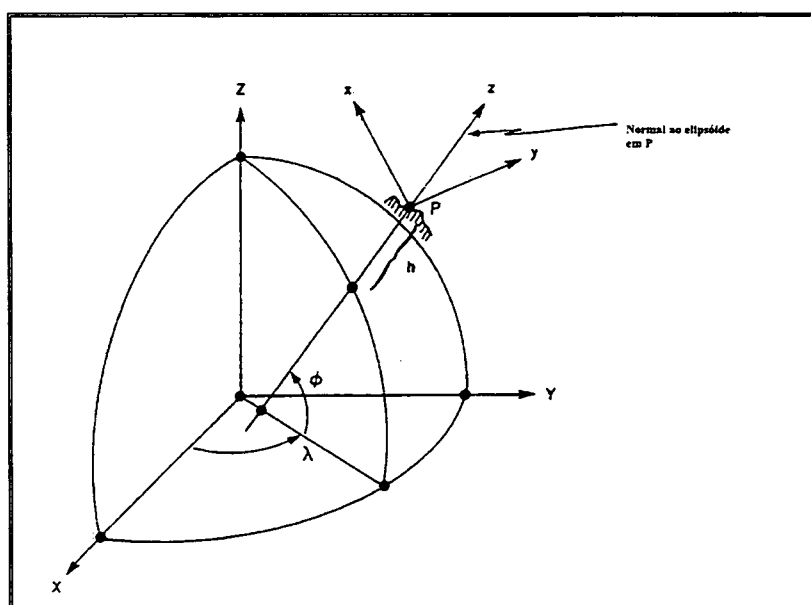


apresentadas no capítulo 3.

### 2.1.5 Sistema Geodésico Local (GL)

Em analogia ao AL, o GL é caracterizado por:

- Origem coincidente em qualquer ponto P na superfície topográfica;
- Não está associado com as características físicas da Terra. Em contrapartida, adota-se um sólido geométrico – elipsóide de revolução, para a representação das coordenadas geodésicas. As retas perpendiculares à superfície do elipsóide são denominadas de normal. Deste modo, a cada ponto do espaço passa uma única reta normal;
- eixo Z (terciário) coincidente com a normal ao elipsóide no ponto P, sendo orientado positivamente no sentido oposto ao vetor da gravidade. O plano primário que contém P é perpendicular ao eixo Z.
- O eixo X (primário) orientado positivamente para o norte geodésico;
- O eixo Y (secundário) aponta para o leste geodésico.
- O plano secundário corresponde ao meridiano geodésico de P;
- Polaridade: levógira.
- A FIGURA 4 mostra a relação entre os sistemas GL e CG. A relação entre o GL e o CTS somente existe se o CG for coincidente com o CTS.



#### FIGURA 4 - SISTEMA CTS E GEODÉSICO LOCAL

Sejam as coordenadas do ponto 1 (origem do referencial local) representadas em um GL pela latitude e longitude geodésicas ( $\phi_1$  e  $\lambda_1$ ), e as coordenadas GL de um segundo ponto 2 ( $x_2$ ,  $y_2$ ,  $z_2$ ). O relacionamento das coordenadas GL com as diferenças de coordenadas em um CTS é dado pelas equações (7) e (8) [STEEVES, 1984]:

$$\begin{bmatrix} x_2 \\ y_2 \\ z_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\sin \phi_1 \cos \lambda_1 & -\sin \phi_1 \sin \lambda_1 & \cos \phi_1 \\ -\sin \lambda_1 & \cos \lambda_1 & 0 \\ \cos \phi_1 \cos \lambda_1 & \cos \phi_1 \sin \lambda_1 & \sin \phi_1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta X \\ \Delta Y \\ \Delta Z \end{bmatrix} \quad (7)$$

$$\text{Se } R_{G1} = \begin{bmatrix} -\sin \phi_1 \cos \lambda_1 & -\sin \phi_1 \sin \lambda_1 & \cos \phi_1 \\ -\sin \lambda_1 & \cos \lambda_1 & 0 \\ \cos \phi_1 \cos \lambda_1 & \cos \phi_1 \sin \lambda_1 & \sin \phi_1 \end{bmatrix}, \text{ então } \begin{bmatrix} x_2 \\ y_2 \\ z_2 \end{bmatrix} = R_{G1} \begin{bmatrix} \Delta X \\ \Delta Y \\ \Delta Z \end{bmatrix} \quad (8)$$

Por analogia a formulação apresentada nos itens anteriores, o relacionamento fornecido através dos sistemas AL e GL (eliminando-se os índices em benefício da clareza) é dado por:

$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} = R_G R_A^T \begin{bmatrix} u \\ v \\ w \end{bmatrix} \quad (9)$$

As observações geodésicas terrestres, distâncias, ângulos horizontais e azimutes, reduzidas à normal em P, são as coordenadas esféricas associadas a este sistema.

## 2.2 ASPECTOS CONCEITUAIS SOBRE SISTEMAS DE REFERÊNCIA TERRESTRES

Visando o objetivo final da Geodésia, na determinação da forma e dimensões da Terra, faz-se necessário o relacionamento dos espaços abstratos com a superfície física da Terra. Com este objetivo, a realização prática é feita através do estabelecimento de pontos que consequentemente terão as suas coordenadas referidas a um sistema de referência qualquer. É

neste sentido que são concebidos os sistemas adotados em Geodésia, que serão denominados neste trabalho por Sistemas de Referência Terrestres<sup>6</sup>.

Historicamente, antes das técnicas espaciais de posicionamento, os referenciais geodésicos, conhecidos pela denominação de “datum astro-geodésico horizontal” – DGH, eram obtidos através das seguintes etapas:

- (1) Escolha de um sólido geométrico (elipsóide de revolução), cujos parâmetros definidores são o achatamento e semi-eixo menor. Este sólido por sua vez, representará de uma maneira aproximada as dimensões da Terra, no qual serão desenvolvidos os cálculos geodésicos.
- (2) Definição do posicionamento e orientação do referencial, feita através de 6 parâmetros topocêntricos: as coordenadas do ponto origem (2), a orientação (1-azimute inicial), a separação geóide-elipsóide (ondulação geoidal) e as componentes do desvio da vertical (meridiana e primeiro vertical) [VANICEK e KRAKIWSKY, 1986]. Estas informações têm por objetivo, assegurar uma boa adaptação entre a superfície do elipsóide ao geóide na região onde o referencial será desenvolvido. Sendo assim, o centro do elipsóide não está localizada no geocentro.
- (3) A realização (ou materialização) do referencial é feita através do cálculo de coordenadas dos pontos a partir de observações geodésicas de distâncias, ângulos e azimutes, ou seja, observações de origem terrestre.

Os itens 1 e 2 abordam os aspectos definidores do sistema, enquanto o item 3 aborda o aspecto prático na sua obtenção. Deste modo, as coordenadas geodésicas estão sempre associadas a um determinado referencial, mas não o definem.

---

<sup>6</sup> Em outras publicações [VANICEK e KRAKIWSKY, 1986, CASTAÑEDA, 1986] encontra-se o termo “sistemas geodésicos”.

O conjunto de pontos ou estações terrestres formam as chamadas redes geodésicas, as quais vêm a representar a superfície física da Terra na forma pontual [CASTAÑEDA, 1986]. O posicionamento 3D de um ponto estabelecido por métodos e procedimentos da Geodésia Clássica (triangulação, poligonação e trilateração) é incompleta, na medida em que as redes verticais e horizontais caminham separadamente. No caso de redes horizontais, algumas de suas estações não possuem altitudes, ou as altitudes são determinadas por procedimentos menos rigorosos e precisos. Entretanto, no estabelecimento de redes verticais se passa o oposto, existindo uma preocupação maior na precisão das altitudes do que nas coordenadas horizontais. Um exemplo de DGH em uso no Brasil é o SAD69, sobre o qual, serão abordados maiores detalhes no capítulo 4.

Os Sistemas de Referência Terrestres, concebidos na era da Geodésia Espacial, possuem características diferentes dos referenciais (ex: DGH) relatados anteriormente, mas a sua essência é a mesma no sentido de possuir uma parte definidora, e atrelada a ela, uma materialização. As etapas necessárias na obtenção destes sistemas terrestres são:

- (1) Adoção de uma plataforma de referência que venha a representar a forma e dimensões da Terra em caráter global. Estas plataformas de referência, os chamados Sistemas Geodésicos de Referência – SGR, conforme abordado anteriormente, estão fundamentados em um CTS (espaço abstrato), sendo portanto geocêntricos. Eles são derivados de extensas observações do campo gravitacional terrestre a partir de observações a satélites, fornecendo assim, o fundamento preciso para a organização de toda informação pertinente à Terra [NIMA,1997]. Eles são definidos por modelos, parâmetros e constantes (ex: um sistema de coordenadas cartesianas geocêntrico - CTS e constantes do GRS80) [DGFI, 1998a]. De tempos em tempos é adotado um novo SGR pela IUGG, sendo este baseado nas últimas informações coletadas sobre o campo gravitacional terrestre. Atualmente o SGR adotado pela IUGG é o GRS80 [TORGE, 1996]. Além das constantes geométricas definidoras, os SGR modernos passam a ser definidos também por constantes físicas. Considerando a Terra um corpo com rotação e massa, a melhor aproximação física é definida através de quatro parâmetros, sendo eles: raio equatorial (o equivalente ao semi-eixo

maior do elipsóide de referência), constante gravitacional geocêntrica  $GM$  (com ou sem atmosfera), o harmônico zonal de segunda ordem do potencial gravitacional da Terra ( $J_2$ ), ou o achatamento terrestre ( $f$ ) e a velocidade de rotação da Terra ( $\omega$ ). Estas constantes estão implicitamente relacionadas às órbitas dos satélites, que por sua vez são usadas para definir as coordenadas de pontos na superfície da Terra.

- (2) A materialização de um sistema de referência terrestre geocêntrico é dada da mesma forma que um DGH, ou seja, através das redes geodésicas. Entretanto, os métodos e procedimentos utilizados no estabelecimento de coordenadas são as técnicas espaciais de posicionamento, como por exemplo o VLBI (Very Long Baseline Interferometry), SLR (Satellite Laser Range) e o GPS. Estas técnicas possuem duas vantagens perante as outras terrestres. A primeira consiste no posicionamento 3D de uma estação geodésica, e a segunda é a alta precisão fornecida às coordenadas, surgindo como consequência uma quarta componente, associada à época de obtenção das coordenadas. Sendo assim, as coordenadas das estações que compõem a materialização de um sistema de referência terrestre geocêntrico, possuem quatro componentes, três de definição espacial e uma de definição temporal, eventualmente, as velocidades vêm a descrever as variações dos valores das coordenadas com o tempo. Um exemplo prático de sistema de referência terrestre geocêntrico é o IERS Terrestrial Reference System (ITRS), o qual é realizado anualmente através do IERS Terrestrial Reference Frame (ITRF), uma rede de estações fiduciais implantadas por todo mundo, nas quais estão instalados sistemas de medidas SLR, LLR, VLBI e GPS. Outros exemplos serão apresentados nas próximas seções deste capítulo.

## 2.3 EXEMPLOS DE SISTEMAS DE REFERÊNCIA TERRESTRES E SUAS MATERIALIZAÇÕES

O advento dos satélites artificiais, há mais de 35 anos, possibilitou o desenvolvimento prático dos sistemas de referência geocêntricos, como por exemplo o WGS84 e o ITRFyy em suas mais diversas realizações e densificações (ex: SIRGAS). O objetivo desta seção é

apresentar alguns dos sistemas e estruturas de referência em uso pela comunidade internacional e que serão motivo de estudos neste trabalho.

### 2.3.1 WGS84

O WGS84 é a quarta versão de sistema de referência geodésico global estabelecido pelo U.S. Department of Defense (DoD) desde 1960 com o objetivo de fornecer o posicionamento e navegação em qualquer parte do mundo, através de informações espaciais [MALYS & SLATER, 1994]. Na época de sua criação o sistema fornecia precisão métrica em função da limitação fornecida pela técnica observacional utilizada, o Doppler. Por esta razão, uma série de refinamentos foram feitos ao WGS84 nos últimos anos com o objetivo de melhorar a precisão de sua versão original [NIMA, 1997].

### 2.3.2 Definição do WGS84

O sistema WGS84 é definido da seguinte forma [NIMA,1997]:

- Atender as condições de um CTS:
  1. Origem: Centro de massa da Terra, incluindo oceanos e atmosfera
  2. Eixo Z : direção igual ao do Pólo de Referência IERS (IRP), assim definido pelo BIH (época 1984,0) com base nas coordenadas adotadas pelas estações BIH.
  3. Eixo X: é a interseção do Meridiano de Referência IERS (IRM) e o plano que passa pela origem e normal ao eixo Z. O IRM sendo coincidente com o meridiano zero definido pelo BIH (época 1984,0) com base nas coordenadas adotadas pelas estações BIH.
  4. Eixo Y: Completa o sistema ortogonal dextrógiro, conforme pode ser visto na FIGURA 5.
- IRP e o IRM são consistentes com as direções correspondentes no sistema terrestre BIH dentro de  $\pm 0,005''$ . O IRP foi ajustado ao Conventional International Origin – CIO em 1967, sendo mantido estável até 1987. O erro entre o IRP e o CIO é da ordem de  $\pm 0,03''$ .

- A escala corresponde ao sistema de coordenadas locais da Terra, conforme a teoria relativista da gravitação. A unidade de comprimento é o metro.
- Sua orientação está de acordo com as séries dos Parâmetros de Orientação da Terra (EOP) BIH para a época 1984,0.
- modelo de velocidade das estações não deverá produzir qualquer rotação residual com relação à crosta da Terra. Isso significa que a evolução temporal na orientação é mantida através da condição de “*rede não rotante*” com relação ao movimento tectônico horizontal da placas continentais.

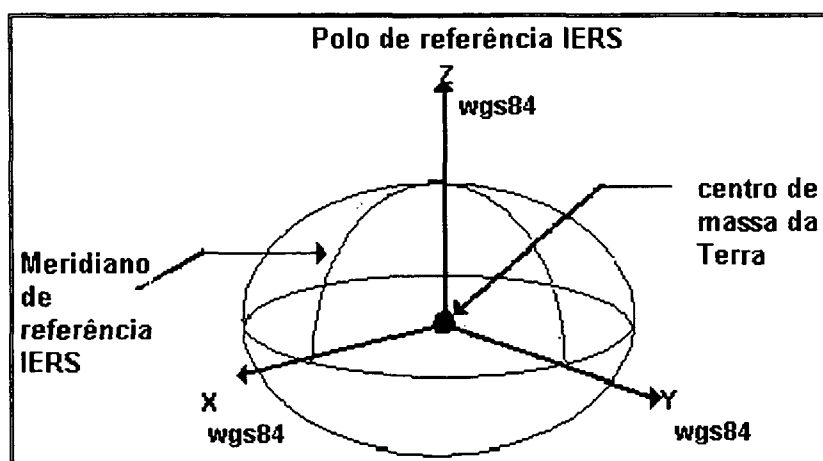


FIGURA 5 - DEFINIÇÃO DO CTS WGS84. fonte: NIMA,1997

O centro geométrico do elipsóide WGS84 é coincidente com a origem do sistema de coordenadas CTS WGS84 e o eixo Z do sistema é coincidente com o eixo de rotação. Os parâmetros definidores do WGS84 podem ser vistos na TABELA 1. Dois parâmetros sofreram alterações com relação aos seus valores adotados originalmente. A primeira alteração surgiu em 1994 quando a constante gravitacional geocêntrica da Terra ( $GM$ ) passou por um refinamento baseado em uma grande quantidade de observações a satélites. O novo valor de  $GM$  foi recomendado para o uso na determinação mais precisa das órbitas DoD [NIMA, 1997]. A segunda alteração ocorreu quando o projeto EGM96 proporcionou um novo valor para o coeficiente zonal de segundo grau ( $J_2$ )<sup>7</sup>. Para que não fosse adotado um novo valor para o achatamento do elipsóide WGS84, decidiu-se manter o seu valor original.

<sup>7</sup> O achatamento é uma grandeza derivada deste coeficiente e de outros parâmetros físicos.

Atualmente, existem dois valores distintos para o parâmetro  $J_2$ , um dinamicamente derivado como parte do EGM96 e outro geometricamente imposto pelos parâmetros definidores. Na TABELA 1 podem ser observadas diferenças entre os valores do achatamento entre o elipsóide WGS84 e o GRS80. Estas diferenças surgem porque o DMA usou no WGS84 a forma normalizada do coeficiente  $J_2$  como constante fundamental, enquanto no GRS80 foi usada a forma não normalizada. Além disso, o valor normalizado usado pelo DMA foi obtido através de um relacionamento truncado ( $\bar{J}_2 = -J_2 / (5)^{1/2}$ ) e arredondando o resultado para 8 casas decimais [NOAA, 1989].

TABELA 1 - PARÂMETROS DEFINIDORES DO WGS84 E GRS80.

Parâmetros	Notação	GRS 80	WGS 84 (G873)
Semi-eixo maior	a	6378137,0 m	6378137,0 m
Achatamento	1/f	298,257222101	298,257223563
Velocidade angular da terra	$\omega$	$7292115 \times 10^{-11}$ rad./s	$7292115,0 \times 10^{-11}$ rad/s
Constante gravitacional da Terra (massa da atmosfera incluída)	GM	$0,3986005 \times 10^8$ m <sup>3</sup> /s <sup>2</sup>	$0,3986004418 \times 10^8$ m <sup>3</sup> /s <sup>2</sup>



### 2.3.3 Materialização do WGS84

Seguindo a terminologia proposta neste trabalho é necessário fazer uma distinção entre a definição de um sistema de referência e a sua realização prática (materialização) através de uma rede de referência. A rede terrestre de referência do WGS84 foi originalmente estabelecida em 1987, contando somente com coordenadas de estações obtidas através de observações Doppler (posicionamento isolado) e efemérides precisas [KOUBA e POPELAR, 1995]. O principal esforço na época era fazer coincidir a origem, orientação e escala do WGS84 ao BTS84 (BIH Terrestrial System 1984,0). O objetivo foi alcançado através da elevada precisão obtida nos parâmetros de transformação estimados entre os sistemas NSWG 9Z-2 e BTS84. Como por exemplo, a precisão da escala é coincidente com o BTS84 ao nível de 10 centímetros [NIMA, 1997]. Entretanto, as coordenadas do conjunto de estações que participavam da rede de referência apresentavam uma precisão de 1-2 metros com relação ao BTS84, refletindo, neste caso, as limitações nas técnicas usadas para estimar coordenadas derivadas do Doppler (sistema TRANSIT). Isso é comprovado através de estudos que demonstraram um erro sistemático (atribuído à limitada precisão fornecida pelo sistema Doppler) na altitude elipsoidal comparando os valores obtidos por GPS e Doppler. As melhorias na precisão do sistema WGS84 foram alcançadas através da adoção da técnica GPS nas 10 estações de controle (rede WGS84 - GPS) para a geração das órbitas operacionais e parâmetros dos relógios dos satélites .

O primeiro refinamento foi obtido através de uma nova materialização do sistema, desta vez com 32 estações (10 estações DoD correspondentes à rede de referência WGS84 original (GPS) e mais 22 estações pertencentes a rede IGS) [SWIFT,1994]. Esta solução recebeu a denominação de WGS84 (G730) (época de referência 1994,0) e foi utilizada nas órbitas operacionais dos satélites GPS de 29 junho de 1994 à 29 de janeiro de 1997. A letra G significa que neste refinamento foi utilizada a técnica GPS e '730' se refere a semana GPS desta solução. O método de cálculo das novas coordenadas é similar ao aplicado no IGS. Neste método as órbitas são estimadas simultaneamente com as coordenadas das estações, sendo que 8 estações (IGS) tiveram as suas coordenadas fixas ao ITRF. A precisão atingida

em cada componente nas coordenadas desta solução foi da ordem de 10 cm ( $1\sigma$ ) para estações permanentes DoD [NIMA, 1997]. Estas 8 estações determinam o sistema de referência das órbitas estimadas. Esta solução possui uma consistência com o ITRF92 ao nível de 10 cm [NIMA, 1997]. A partir dela, passou a se utilizar modelo de movimento de placas para estimar as velocidades das estações, neste caso o modelo utilizado foi o NNR-NUVEL1A.

O segundo refinamento foi um trabalho que envolveu três instituições: NIMA, NASA Goddard Space Flight Center (GSFC) e Ohio State University. O resultado foi o desenvolvimento de um novo modelo global do campo gravitacional terrestre: EGM96 [NIMA, 1997]. O refinamento do modelo gravitacional foi conseguido graças a uma enorme quantidade de dados de posicionamento preciso por satélites, observações terrestres de gravidade, observações altimétricas por satélites, tais como GEOSAT, ERS-1 e TOPEX/POSEIDON. Sendo assim, este modelo assumiu o lugar do modelo gravitacional WGS84 criado a mais de 10 anos. Consequentemente, foi gerado um geóide global mais preciso. Este geóide, que recebeu a denominação de WGS84 (EGM96), possui uma precisão de 0,43 cm ( $1\sigma$ ), globalmente [PAVLIS, 1997]. Entretanto, no Boletim nº 6 do Serviço Internacional do Geóide estão publicadas avaliações deste modelo em diversas partes do mundo.

Uma nova materialização da rede terrestre de referência WGS84, recebeu a denominação WGS84 (G873), referida a semana GPS 873 (época de referência 1997,0). Ela foi baseada em observações GPS de 12 estações DoD (duas estações a mais referente à antiga materialização). As componentes das coordenadas destas estações foram determinadas com uma precisão absoluta de 5 cm ( $1\sigma$ ) [NIMA, 1997]. Esta versão foi implementada no segmento de controle operacional em 29 de janeiro de 1997, sendo utilizada até o presente momento. Extensivas comparações diárias de efemérides precisas WGS84 (G873) com as efemérides IGS/ITRF94 revelam diferenças sistemáticas inferiores a 2 cm entre as duas materializações [NIMA, 1997]. Deve-se ter em mente que, as efemérides representam a materialização de um sistema de referência, a qual difere muito pouco da sua correspondente projeção obtida a partir de estações na Terra. Os refinamentos na rede de referência WGS84, se traduzem em

diferenças no posicionamento inferiores a 30 cm. Estas diferenças para utilização na cartografia (em geral) ou navegação, podem ser desprezadas [NIMA,1997].

O NIMA reconhece que novas realizações da rede de referência são necessárias a medida que forem incluídas novas estações ou no caso da troca de equipamentos, garantindo assim uma maior confiabilidade no sistema. Na TABELA 2 pode ser visto em linhas gerais as diferenças entre as versões do WGS84. Os parâmetros de transformação entre o WGS84 (original) materializado por Doppler e o WGS84(G730) podem ser vistos na TABELA 3, bem como os valores obtidos entre o WGS84(G730) e ITRF92.

TABELA 2 - DIFERENÇAS ENTRE AS VERSÕES WGS84.

Versão	Sistema utilizado na materialização	Número de estações utilizadas na materialização	Modelos gravitacionais da Terra	Períodos de Utilização
WGS84	TRANSIT(NSWC 9Z-2 )	10	WGS84	01/01/1987 à 01/01/1994
WGS84(G730)	GPS	10	WGS84	02/01/1994 à 28/09/1997
WGS84(G873)	GPS	12	EGM96	a partir de 29/09/1997

TABELA 3 - PARÂMETROS DE TRANSFORMAÇÃO ENTRE O WGS84 (ORIGINAL-DOPPLER) E WGS84 (G730), ÉPOCA 1988,0 E PARÂMETROS ENTRE WGS(G730) E ITRF92.

Parâmetro	WGS84(original) X WGS84(G730)	WGS84(G730) X ITRF92
Translação em X	-4 cm	-0,9 cm
Translação em Y	-1 cm	0,8 cm
Translação em Z	-28 cm	-2,3 cm
Escala	-21,8 ( -139 cm no equador) ppb	7,6 ppb
Rotação em X	4,2 mas	-3,6 mas
Rotação em Y	-4,0 mas	0,6 mas
Rotação em Z	-15,6 (-48 cm no equador) mas	3,1 mas



### 2.3.4 ITRS

O ITRS é um exemplo de CTS definido por um conjunto de modelos e definições globais [BOUCHER & ALTAMIMI, 1996]. Os conceitos de sistema de referência e estrutura de referência no contexto do IERS são:

**Sistema de Referência** é um conjunto de definições e convenções, referente a um modelo, necessários para definir em qualquer momento um triáde de eixos cartesianos.

**Estrutura de Referência** (ou rede de referência) é a materialização prática do sistema, feita por um conjunto de coordenadas de estações estimadas através de técnicas espaciais de posicionamento, recebendo a denominação de ITRF.

O BIH estabeleceu em 1984 o BTS84, baseado em observações VLBI, SLR, LLR e Doppler seguindo as resoluções da UGGI e IAU. Em 1988 foi criado o IERS com o propósito de fornecer à comunidade internacional, dados atualizados dos ICRS, ITRS e EOPs, conectando os dois sistemas [TORGE, 1996]. Nesta época foi estabelecido um sistema de referência terrestre denominado ITRF88, atendendo as mesmas condições do WGS84 descritas na seção 2.3.2. Anualmente, o IERS fornece valores atualizados para estes sistemas de referência, através de novas materializações da Rede de Referência Terrestre - ITRF e da Rede de Referência Celeste - ICRF. Eles estimam coordenadas de fontes de rádio e de estações terrestres (mais de 100) que participam do serviço, bem como parâmetros de rotação da Terra. As densificações dos ITRFyy através dos sistemas de referência regionais estão em fase de construção utilizando-se observações GPS, que são conectadas a uma época do ITRF. Dois exemplos de redes regionais são EUREF e SIRGAS.

Em 1991, pela primeira vez, o IERS incluiu resultados dos processamentos das observações GPS às suas soluções e em 1994 foram incluídas observações oriundas da técnica DORIS. Com o estabelecimento do IGS em 1994, o ITRF está diretamente acessível aos usuários de todo o mundo através das órbitas (rápidas e combinadas), relógio dos satélites GPS e das coordenadas/velocidades das estações da rede global IERS.

### 2.3.5 Definição do ITRS

A definição de um ITRS é a mesma utilizada pelo WGS84 , detalhada no item 2.4.2 deste trabalho. Com relação as constantes físicas e geométricas, apenas o achatamento ( $1/f = 298,257222101$ ) difere do WGS84, isso porque o elipsóide de referência recomendado para o ITRF no cálculo das coordenadas geodésicas é o GRS80 [McCARTHY, 1996].

### 2.3.6 Materialização do ITRS

A materialização ITRS consiste em um conjunto de coordenadas cartesianas e velocidades das estações, bem como a completa MVC destes parâmetros [BOUCHER & ALTAMIMI, 1997]. Os parâmetros de posição (coordenadas e velocidades) são produzidos a partir de uma combinação de um conjunto de coordenadas e velocidades determinadas através das mais precisas técnicas espaciais de posicionamento, tais como VLBI, SLR, LLR, GPS e DORIS, provenientes de vários centros de análises. A idéia básica de combinar os resultados de várias técnicas diferentes, é evitar erros sistemáticos oriundos de uma técnica específica, sendo a combinação a única maneira de se alcançar confiabilidade, juntamente com a precisão.

O ITRS é conectado ao ICRS através dos IERS EOP. Atualmente, as soluções ITRFyy são publicadas nos Technical Notes IERS. A materialização inicial feita pelo IERS recebeu a denominação de ITRF-0. Nela, foram adotados origem, orientação e escala do BTS87. A solução do ITRF-0 está publicada no IERS Technical Note 4 [BOUCHER & ALTAMIMI, 1990]. A primeira materialização do ITRS, publicada no IERS Annual Report 1988, foi o ITRF88, seguindo a mesma origem, orientação e escala do ITRF-0. As duas soluções subsequentes foram o ITRF89 e ITRF90. A origem e escala destas materializações são dadas em função de soluções de SLR do Center for Space Research da Universidade do Texas [BOUCHER & ALTAMIMI, 1991]. A orientação em ambos casos foi definida de modo que não existe rotação global com o ITRF88 e ITRF89, respectivamente. Para todas realizações

abordadas acima, não foram estimados campo de velocidades em suas soluções. Foi utilizado apenas o modelo AM0-2 para corrigir a evolução do tempo no ITRS.

Em linhas gerais, as soluções ITRF são geradas através das seguintes etapas [IERS, 1998]:

- (1) Fornecimento das coordenadas e velocidades, bem como as suas MVC completas, pelos centros de processamento e análises. Estas informações são enviadas ao IERS CB no formato padrão SINEX;
- (2) Redução de cada solução individual à época que será a referência ( $t_0$ ) da nova solução, através dos valores das velocidades fornecidos pelo modelo de movimento de placas (NNR NUVEL1A), como por exemplo: a época para o ITRF97 é 1997,0;
- (3) Obtenção dos valores de excentricidade de cada estação, no caso dela possuir valores referidos a mais de uma técnica espacial. Estas informações são importantes para gerar a solução final através da combinação das diferentes técnicas espaciais;
- (4) Ajustamento das diversas soluções individuais de uma determinada técnica. Neste ajustamento são estimadas as variâncias das componentes usando o método de Helmert [BOUCHER et al., 1997], para que esta solução receba uma aplicação do fator de escala na combinação final;
- (5) Na obtenção da solução final ITRFyy é realizada a determinação dos 7 parâmetros de transformação (transformação de similaridade), entre as diferentes soluções obtidas em cada técnica, obtendo-se assim diferença entre elas com o ITRFyy;
- (6) Após a combinação, a definição do sistema de referência (origem, escala, orientação e evolução temporal) é mantida igual à versão anterior do ITRF. Este procedimento foi adotado particularmente, nas realizações ITRF94, ITRF96 e ITRF97;
- (7) As velocidades obtidas na solução ITRFyy serão as mesmas em cada estação, independente da técnica de observação utilizada.

Em algumas soluções ITRFyy o procedimento acima foi alterado devido ao tratamento particular dado em cada solução ITRF, tais como [IERS, 1998]:

- As velocidades passaram a ser estimadas a partir do ITRF93. Anteriormente, eram adotados apenas os valores fornecidos pelo modelo de movimento de placas AM0-2 para redução das coordenadas à época de referência da solução. Todas as versões anteriores ao ITRF93 tinham como época de referência 1988,0,
- O modelo de movimento de placas AM0-2, usado com o objetivo de fornecer as velocidades das coordenadas das estações, foi substituído pelo NNR NUVEL-1A, a partir da solução do ITRF93,
- Na solução do ITRF94 foi adotado um critério de classificação das estações, sendo utilizadas na combinação final somente aquelas as estações referidas como classe A, B e C (esta classificação foi baseada na precisão final das coordenadas das estações),
- A orientação dos sistemas de referência ITRFyy sofreu algumas alterações. Do ITRF88 ao ITRF92, a orientação foi definida de modo que não exista rotação entre esses referenciais. A orientação do ITRF93 foi injuncionada para ser consistente com os parâmetros de orientação na época 1988,0, obtidos segundo combinação de soluções SLR e VLBI. Posteriormente, a orientação do ITRF94 foi injuncionada para ser consistente com o ITRF92 na época 1988,0. Do ITRF88 ao ITRF93 a escala adotada foi aquela referente às soluções SLR. A partir do ITRF94 a escala e origem adotada foi aquela fornecida segundo a média ponderada de uma seleção de soluções VLBI, SLR e GPS [BOUCHER e ALTAMINI, 1996].

As duas últimas realizações ITRS, foram o ITRF96 e ITRF97. O ITRF96 passou a ser adotado nas órbitas IGS em março de 1998 [KOUBA, 1998]. Para esta solução foi desenvolvido um novo modelo de combinação de dados (MVC completa, preservando as correlações entre as coordenadas das estações), bem como um modelo estocástico, para uma análise estatística mais refinada. Pela primeira vez foi alcançada a precisão de 1 cm nas coordenadas de mais de 50% das estações e 30% das estações têm suas velocidades calculadas livres de qualquer informação *a priori*, oriunda de modelos de tectônica de placas, e com uma precisão melhor que 3 mm/ano. Além disso, foi elaborado um software que trabalha com todas as informações da MVC, enquanto para as outras versões do ITRFyy, foram usadas somente as variâncias das coordenadas [BOUCHER et al., 1997].



Para solução ITRF96, foram utilizadas 540 estações em 290 localidades, fornecendo uma melhor cobertura global. As velocidades das estações também são determinadas a um nível muito preciso, permitindo determinações de modelos cinemáticos de movimento de placas, livre de qualquer suposição geológica. Com este objetivo foi feita a combinação de 17 soluções individuais (TABELA 4), oriundas de medidas de VLBI, SLR, GPS e DORIS. Foram usadas apenas as injunções fornecidas pela MVC das observações.

Com estes resultados foi desenvolvida uma análise do pólo do campo de velocidade (vetores das componentes de velocidade em um sistema cartesiano tridimensional - maiores detalhes, ver capítulo 5) do ITRF96, a fim de comparar o campo de velocidades cartesianas do ITRF96 com alguns modelos de movimento de placas. Os resultados desta comparação com o modelo NNR-NUVEL-1A não foram satisfatórios para a placa Sul-americana, induzindo a conclusão de que existe um problema no cálculo do pólo de rotação desta placa quando se utiliza este modelo. Todavia, com exceção da placa Sul-americana, esse novo modelo de velocidade é mais preciso do que as versões anteriores do ITRFyy. Resumidamente, pode-se dizer que o campo de velocidade ITRF96 é uma informação mais completa do ponto de vista geodésico, do que os modelos geofísicos, e sendo uma ferramenta muito útil para os estudos de geodinâmica [SILLARD et al., 1998].

O procedimento de cálculo para as coordenadas e velocidades referidas ao ITRF97 foi idêntico ao mesmo aplicado na versão anterior (ITRF96), diferenciando somente a quantidade de estações usadas que passaram a ser 314. O ITRF97 (época 1997,0) é a última materialização do ITRS, sendo considerado o sistema de referência mais preciso da série.

A TABELA 4 contém algumas particularidades das diversas versões ITRFyy, enquanto na TABELA 5 são fornecidos os parâmetros de transformação do ITRF94 com as outras versões de ITRFyy. Até o momento o IERS não publicou oficialmente parâmetros de transformação do ITRF97 com as versões anteriores, considerando que na sua solução, a origem, escala e orientação e evolução temporal da combinação foi obtida de forma a ser o

mesmo que o ITRF96<sup>8</sup> [IERS, 1998]. Existem apenas parâmetros de transformação entre o ITRFyy com a solução individual de cada técnica espacial utilizada na solução combinada.

TABELA 4 - VERSÕES DO ITRF E SUAS PARTICULARIDADES.

Versão (época de referência)	Número de Soluções Utilizadas						Modelo de Movimento de Placas	Número de estações	$\sigma_0^2$ <sup>10</sup>
	VLBI	SLR	LLR	GPS	DORIS	Multi - Technique <sup>9</sup>			
ITRF-0(1988,0)	2	2	-	-	-	-	AM0-2		2,8
ITRF88(1988,0)	6	5	4	-	-	-	AM0-2		5,5
ITRF89(1988,0)	4	6	2	-	-	-	AM0-2		1,3
ITRF90(1988,0)	4	7	2	-	-	-	AM0-2	121	1,3
ITRF92(1988,0)	5	6	3	6	-	-	NNR NUVEL1	152	
ITRF93(1993,0)	6	4	4	1	-	-	NNR NUVEL1A	157	
ITRF94(1993,0)	4	2	-	3	3	-	NNR NUVEL1A	201	
ITRF96(1997,0)	4	2	-	8	3	-	NNR NUVEL1A	290	1,32
ITRF97(1997,0)	4	5	-	6	3	1	NNR NUVEL1A	314	

TABELA 5 - PARÂMETROS DE TRANSFORMAÇÃO<sup>11</sup> DO ITRF94 COM RELAÇÃO AS OUTRAS SOLUÇÕES ITRFyy.

Sistema de Coordenadas (datum)	T1 (cm)	T2 (cm)	T3 (cm)	Esc. (ppb)	R1 (mas)	R2 (mas)	R3 (mas)	Época
ITRF88	1,8	0,0	-9,2	7,4	0,1	0,0	0,0	1988,0
ITRF89	2,3	3,6	-6,8	4,3	0,0	0,0	0,0	1988,0
ITRF90	1,8	1,2	-3,0	0,9	0,0	0,0	0,0	1988,0
ITRF91	2,0	1,6	-1,4	0,6	0,0	0,0	0,0	1988,0
ITRF92	0,8	0,2	-0,8	-0,8	0,0	0,0	0,0	1988,0
ITRF93	0,6	-0,5	-1,5	0,4	-0,39	0,80	-0,96	1988,0
Variação	-0,29	0,04	0,08	0,00	-0,11	-0,19	0,05	

fonte: [MCCARTHY, 1996].

### 2.3.7 Sistema SIRGAS

<sup>8</sup> O mesmo procedimento é descrito na transição de ITRF94 para ITRF96.

<sup>9</sup> Soluções SLR + DORIS.

<sup>10</sup>  $\sigma_0^2$  = variância da unidade de peso à posteriori, indicador estatístico da qualidade da combinação final (valor teórico 1.0).

<sup>11</sup> T1, T2 e T3 representam as translações; R1, R2 e R3 as rotações e Esc a escala, entre sistemas de referência.

O Projeto SIRGAS começou em outubro de 1993, numa reunião realizada em Assunção - Paraguai, com o objetivo de estabelecer um sistema de referência geocêntrico para a América Sul [IBGE, 1997]. Desde a sua criação, o projeto contou com o apoio de várias instituições internacionais, tais como: Associação Internacional de Geodésia (IAG), Instituto Pan-Americano de Geografia e História (IPGH), National Imagery and Mapping Agency (NIMA) e Deutsches Geodätisches Forschungsinstitut (DGFI) e a contribuição de todos países sul-americanos, colaborando expressivamente para o seu êxito. Nesta reunião foram definidos os objetivos do projeto, os quais visavam:

- Definição de um sistema geocêntrico de referência para a América do Sul, adotando-se inicialmente o IERS Terrestrial Reference Frame - ITRF93 e elipsóide do GRS-80.
- Estabelecimento e manutenção de uma rede de referência; tarefa atribuída ao Grupo de Trabalho I - Sistema de Referência.
- Estabelecimento e Manutenção de um datum geocêntrico; tarefa atribuída ao Grupo de Trabalho II - Datum Geocêntrico.

Em 1995, nos meses de maio e junho, foi realizada a primeira parte do projeto, estabelecendo-se uma rede GPS de alta precisão com 58 estações (rede SIRGAS), cobrindo de forma quase homogênea o continente (vide FIGURA 6). Para o sucesso das medições foram adotados critérios quanto a seleção das estações, tipo de equipamento, coleta e organização dos dados. As estações escolhidas deveriam estar em locais de fácil acesso e de preferência coincidentes com a rede geodésica existente. Os receptores usados deveriam ter características geodésicas (código e fase em L1 e L2). Na rede SIRGAS foram utilizados vários tipos de receptores e antenas, cada um possuindo diferentes posições do centro de fase. Como na época as variações do centro de fase nas antenas de receptores geodésicos eram desconhecidas e com o objetivo de eliminar o erro causado pelo desconhecimento desta informação, foi decidido colocar 9 estações excêntricas que fizeram a ligação entre as redes de diferentes tipos de receptores [IBGE, 1997].



FIGURA 6 - REDE DE REFERÊNCIA SIRGAS. [fonte: DGFI, 1998c].

O processamento e ajustamento dos dados foram efetuados pelo DGFI e NIMA utilizando diferentes metodologias e programas. A TABELA 6 ilustra de forma comparativa os procedimentos adotados por cada instituição.

	DGFI	NIMA
<b>software</b>	Bernese, versão 3.4	GIPSY - OASIS II
<b>efemérides</b>	Precisas Combinadas IGS	Precisas JPL
<b>modelagem</b>	simples diferença	zero diferença
<b>ajustamento</b>	rede livre	rede livre
<b>sistema de referência</b>	ITRF93 (época 1995,4)	ITRF93 (época 1995,4)
<b>estações de referência IGS utilizadas na transformação de ITRF93 para ITRF94</b>	Arequipa, Ilha de Páscoa, Fortaleza, Kourou, Santiago, Richmond, O'Higgins	Arequipa, Ilha de Páscoa, Fortaleza, Kourou, Santiago

Em ambas instituições foram geradas soluções diárias (sessões processadas) de redes livres, uma para cada tipo de conjunto receptor/antena. Na época da divulgação dos resultados, já estavam disponíveis informações em ITRF94, mas todo processamento estava referido ao sistema das efemérides/dados da época da campanha - ITRF93. Deste modo, ambas instituições transformaram seus resultados para ITRF94, época 1995,4 utilizando algumas estações IGS pertencentes a rede SIRGAS (vide TABELA 6). A maior diferença encontrada entre as soluções NIMA e DGFI foi de 3,5 cm [IBGE, 1997]. Os procedimentos adotados para gerar uma solução final são descritos nas etapas abaixo.

- Como a correção da variação do centro de fase da antena em função do ângulo de elevação, não foi aplicada na solução NIMA, decidiu-se calcular parâmetros de transformação para cada sub-rede correspondente ao tipo de antena. As diferenças provenientes da correção aplicada na solução DGFI estão implicitamente consideradas nos parâmetros de transformação;
- Aplicação dos parâmetros de transformação às coordenadas NIMA, reduzindo o valor da diferença máxima entre as duas soluções (NIMA e DGFI) para 0,9 cm;
- Cálculo da média das coordenadas DGFI e NIMA (transformadas) em ITRF93;
- Para a determinação dos parâmetros de transformação finais utilizaram-se nove estações IGS (Arequipa, Fortaleza, Kourou, Santiago, Bogotá, Brasília, La Plata, Ilha de Páscoa, O'Higgins). Para estas estações foram adotadas as coordenadas médias da solução do Centro de Determinação de Órbita da Europa (CODE) e do Jet Propulsion Laboratory (JPL) referidas ao ITRF94 (época 1993,0) e extrapoladas através das velocidades para época 1995,4.

Todo este esforço, veio a proporcionar um dos mais precisos sistemas de referência tridimensional baseado numa das mais modernas técnicas de posicionamento utilizadas hoje em dia.

### **2.3.8 Diferenças entre SIRGAS, ITRF e WGS84**

Em que sistema de referência estão as coordenadas finais quando se realiza um levantamento com GPS? Existem várias respostas para esta pergunta que dependem das órbitas e injunções utilizadas no processamento das observações GPS. A resposta será WGS84 para processamentos realizados com órbitas transmitidas WGS84 e ITRFyy para processamentos feitos com órbitas precisas (ou combinadas) IGS. Quando são obtidas coordenadas SIRGAS em levantamentos com GPS? Considerando o SIRGAS uma densificação do ITRF94 na América do Sul, basta apenas efetuar o processamento com efemérides precisas e adotar injunções SIRGAS, isto é, coordenadas SIRGAS das estações de referência no processamento.

O relacionamento entre ITRFyy e GPS tornou-se mais importante com a criação do IGS em 1992. O IGS e IERS trabalham em cooperação, de modo que, o IERS está incumbido do cálculo das coordenadas e velocidades e dos parâmetros de orientação terrestre. Enquanto ao IGS é dada a atribuição de fornecer o acesso à nova realização do sistema ITRFyy através das órbitas combinadas IGS. Esta ligação é fornecida a partir de um conjunto reduzido de estações ITRF/IGS no cálculo das órbitas combinadas. Os diversos referenciais utilizados nas órbitas IGS e seus respectivos períodos de utilização constam na TABELA 7.

A fragmentação da crosta terrestre em diversas partes, recebe a denominação de placas litosféricas. Em decorrência de aspectos geodinâmicos, estas placas se movem continuamente em diferentes magnitude e direções, de acordo com a região em que estão localizadas. Se estes elementos forem conhecidos pode-se estabelecer a variação das coordenadas dos pontos localizados sobre as placas. Em outras palavras, o movimento das placas na crosta terrestre faz com que a coordenada geodésica de um ponto dependa da época à qual a informação foi

obtida. Sendo assim, as estruturas geodésicas concebidas hoje em dia, possuem além das três componentes definidoras de um ponto no espaço a componente de definição temporal. Um exemplo disso é o SIRGAS, cujas coordenadas estão referidas à época 1995,4. Portanto, antes de se usar coordenadas SIRGAS como injeção em qualquer processamento GPS, deve-se reduzi-las à época das observações GPS, através de modelos geofísicos ou geodésicos de movimentos de placas. Após o processamento/ajustamento das observações, as coordenadas deverão retornar à época SIRGAS.

**TABELA 7 - REFERENCIAIS UTILIZADOS NAS ÓRBITAS IGS.**

Sistema de referência das órbitas IGS	Período de utilização
ITRF91	ano 1993
ITRF92	ano 1994
ITRF93	ano 1995
ITRF94	julho de 1996 à março de 1998
ITRF96	março de 1998 até a presente data

## **2.4 TRANSFORMAÇÕES ASSOCIADAS AOS SISTEMAS DE REFERÊNCIA TERRESTRES**

O posicionamento preciso fornecido pela aplicação das técnicas e métodos espaciais de posicionamento requer uma completa compreensão sobre transformações de sistemas de referência. O fator mais complicante se resume no fato de que as observações GPS, por exemplo, são realizadas nas placas móveis da litosfera. A teoria da tectônica de placas é comprovada atualmente pelas técnicas da Geodésia Espacial. Movimentos absolutos de pontos na superfície da Terra com relação a um sistema de referência, são da ordem de 3 cm/ano, mas dependem da localização geográfica do ponto. Um exemplo são os movimentos da crosta em áreas de subducção que podem ser maiores que 24 cm/ano.

A fim de aplicar corretamente as transformações quando se usa dados de soluções GPS de diferentes épocas, os efeitos dos movimentos de placas sobre as coordenadas deveriam ser precisamente considerados. Deve estar claro, que os resultados das observações GPS, as coordenadas geodésicas ou coordenadas cartesianas, estão no mesmo sistema terrestre das efemérides dos satélites, usadas durante o processamento dos dados GPS. Estas coordenadas

são referidas à uma época específica  $t_0$  e transformações são necessárias quando dados de diferentes épocas são combinados. Concluída esta etapa, pode-se fazer uma rigorosa comparação entre os resultados obtidos em diferentes épocas. Antes de apresentar as equações que relacionam coordenadas e velocidades afetadas das mudanças de sistemas de referência e épocas, deve-se fazer algumas considerações sobre o sistema cartesiano de coordenadas sobre o qual a formulação está relacionada. Um sistema cartesiano tridimensional é uma particularidade do espaço euclidiano, sendo representado por um terno de eixos ortogonais entre si, de sentido dextrogiro, ou seja, as rotações realizadas em torno de seus eixos coordenados ou em torno de qualquer eixo arbitrário são positivas no sentido anti-horário. Dentro deste espaço podem ser realizadas duas transformações [SOLER, 1998]:

- (1) **Transformação Ativa:** Ocorre quando um vetor é rotacionado em torno de um eixo arbitrário com relação a um sistema fixo. Neste caso os eixos cartesianos permanecem fixos, apesar das componentes dos vetores mudarem porque a sua extremidade se move a uma nova posição. Essas rotações são expressas através dos vetores de velocidade angular, denominadas  $\Omega_x$ ,  $\Omega_y$  e  $\Omega_z$  (vide FIGURA 7). Um exemplo prático de uma transformação ativa é o movimento tectônico das placas litosféricas. A matriz rotação formada por estas componentes será [MCCARTHY, 1996]:

$$\Omega = \begin{bmatrix} 0 & -\Omega_z & \Omega_y \\ \Omega_z & 0 & -\Omega_x \\ -\Omega_y & \Omega_x & 0 \end{bmatrix} \quad (10)$$



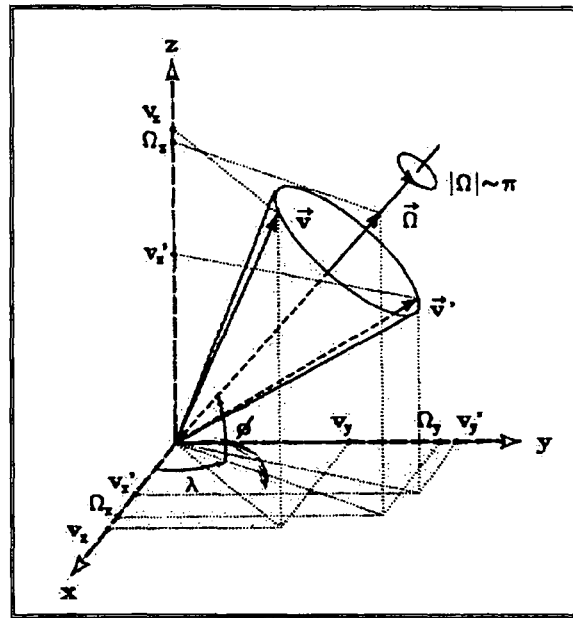


FIGURA 7 - TRANSFORMAÇÃO ATIVA DOS VETORES, NO SISTEMA CTS (O TERNO CARTESIANO PERMANECE FIXO; O VETOR É ROTACIONADO). fonte: SOLER,1998

- (2) **Transformação passiva** : Ocorre quando os eixos coordenados são diferencialmente rotacionados, mantendo-se a extremidade do vetor fixa no espaço. Neste caso, a posição física do vetor permanece invariante no espaço, apesar das componentes dos vetores mudarem devido as rotações dos eixos coordenados. Essas rotações são expressas através dos eixos cartesianos, denominadas  $\varepsilon_x$ ,  $\varepsilon_y$  e  $\varepsilon_z$  (vide FIGURA 8). Será adotada a propriedade de que todas rotações positivas em um espaço tridimensional tem o sentido anti-horário como positivo. Um exemplo prático de uma transformação passiva é a transformação de similaridade. A matriz rotação formada por estas componentes será:

$$\varepsilon' = \begin{bmatrix} 0 & \varepsilon_z & -\varepsilon_y \\ -\varepsilon_z & 0 & \varepsilon_x \\ \varepsilon_y & -\varepsilon_x & 0 \end{bmatrix} \quad (11)$$

Sendo  $\varepsilon'$  a matriz transposta, e se ela é assimétrica  $\varepsilon' = -\varepsilon$ .

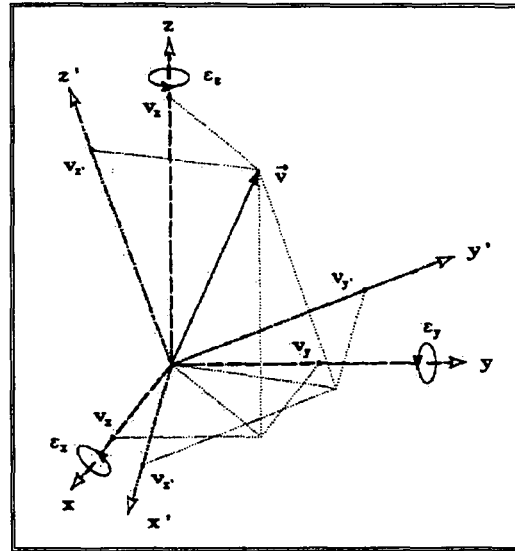


FIGURA 8 - TRANSFORMAÇÃO PASSIVA DOS VETORES NO SISTEMA CTS (O TERNO É ROTACIONADO, O VETOR PERMANECE FIXO). fonte: SOLER,1998

O relacionamento entre dois conjuntos de coordenadas referidos aos sistemas A e B é dado através da transformação de similaridade, escrita da seguinte forma:

$$[X]_B = [T] + (1 + s)[R][X]_A \quad (12)$$

ou

$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix}_B = \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix}_A + \begin{bmatrix} t_x \\ t_y \\ t_z \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} s & \varepsilon_z & -\varepsilon_y \\ -\varepsilon_z & s & \varepsilon_x \\ \varepsilon_y & -\varepsilon_x & s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix}_A \quad (13)$$

Sendo  $[T]' = [t_x \ t_y \ t_z]$  o vetor translação e  $s$  o fator de escala.

$[R]$  = matriz ortogonal que rotaciona do sistema A para B (rotações anti-horárias, positivas). Então  $R$  é dado por :  $[\varepsilon]^t + [I]$ , onde  $[\varepsilon]^t$  é dada em (11) e  $[I]$  é a matriz identidade.

<sup>12</sup> Os produtos do fator de escala pelas rotações são negligenciados.

As coordenadas de qualquer ponto arbitrário que se move com velocidade  $[\dot{X}]_{A(t_0)}$  (referida ao antigo sistema), durante o intervalo  $t_0$  para  $t$  de acordo com:

$$[X]_{A(t)} = [X]_{A(t_0)} + [\dot{X}]_{A(t_0)}(t - t_0) \quad (14)$$

Similarmente, as coordenadas de  $[X]_{B(t)}$  de qualquer ponto no sistema B, na época  $t$ , que se move de  $t_0$  para  $t$  com velocidade  $[\dot{X}]_{B(t_0)}$  são determinadas por:

$$[X]_{B(t)} = [X]_{B(t_0)} + [\dot{X}]_{B(t_0)}(t - t_0) \quad (15)$$

$(t - t_0)$  é o intervalo de tempo expresso em ano e sua fração, sendo  $t$  a época das observações GPS.

A equação (12) que relaciona dois sistemas A e B, referidos à uma época inicial  $t_0$  é:

$$[X]_{B(t_0)} = [T] + (1 + s)[R][X]_{A(t_0)} \quad (16)$$

Substituindo  $(1+s)$  por  $\rho$ , a variação das coordenadas com o tempo ( $dX/dt$ ) a partir de (15) é dada por:

$$[\dot{X}]_{B(t_0)} = [\dot{T}] + \{\dot{\rho}[R] + \rho[\dot{R}]\}[X]_{A(t_0)} + \rho[R][\dot{X}]_{A(t_0)} \quad (17)$$

Entretanto a fim de se conhecer as coordenadas de B na época  $t$ , as duas equações acima, (16) e (17) deveriam ser substituídas em (15), obtendo-se:

$$[X]_{B(t)} = [T] + \rho[R]\{[X]_{A(t_0)} + [\dot{X}]_{A(t_0)}(t - t_0)\} + \{[\dot{T}] + [\dot{\rho}[R] + \rho[\dot{R}]] [X]_{A(t_0)}\}(t - t_0) \quad (18)$$

Em algumas estações os valores de  $[\dot{X}]_{A(t_0)}$  não são conhecidos. Este é o caso de estações que não fazem parte do IGS ou ITRF. Aproximações podem ser obtidas usando qualquer um dos modelos de placas. Neste caso as componentes da velocidade angular  $[\Omega]_{P_i}$  (matriz apresentada na equação (10)) para cada placa  $P_i$ , são quantidades conhecidas que podem ser extraídas a partir dos modelos geofísicos disponíveis. Então uma aproximação para o vetor velocidade, utilizado nas equações (17) e (18) é determinado da seguinte forma:

$$[\dot{X}]_{A(t_0)} = [\Omega]_{P_i} [X]_{A(t_0)} \quad (19)$$

Considerando a formulação apresentada anteriormente, a qual realiza a transformação de um ponto de coordenadas  $ITRF_{yy}$ , época  $t_0$ , para  $ITRF_{zz}$ , época  $t$  (representada pela época das observações GPS, é obtida através da equação (16) assumindo a forma:

$$[X]_{ITRF_{zz}} = [T] + (1 + s)([\varepsilon]' + [I]) \{ [X]_{ITRF_{yy}} + [\dot{X}]_{ITRF_{yy}} (t - t_0) \} \quad (20)$$

Igualmente, a equação (17) passa a ser apresentada por:

$$[\dot{X}]_{ITRF_{zz}} = [\dot{T}] + \{ (1 + s)([\dot{\varepsilon}]' + \dot{s}([\varepsilon]' + [I])) [X]_{ITRF_{yy}} + (1 + s)([\varepsilon]' + [I]) [\dot{X}]_{ITRF_{yy}} \} \quad (21)$$

Exemplos práticos sobre a aplicação da formulação apresentada nesta seção estão no apêndice A.

## 2.5 IMPLICAÇÕES SOBRE A MATERIALIZAÇÃO DE UM SISTEMA DE REFERÊNCIA TERRESTRE

Um sistema de referência terrestre é materializado através de uma rede de referência composta por um conjunto de estações cujas coordenadas foram estabelecidas por alguma técnica de posicionamento espacial. Decorrente da alta precisão alcançada por estas técnicas, as coordenadas das estações estão sempre associadas a uma determinada data, ou melhor dizendo a uma época de referência ( $t_0$ ). O acompanhamento da variação das coordenadas com

o tempo vem a produzir velocidades ( $[\dot{X}_0] = [\dot{x}_x, \dot{x}_y, \dot{x}_z]$ ), obtidas a partir da equação (19). Deste modo, uma rede de referência materializada hoje em dia será representada pelas coordenadas cartesianas (ou curvilíneas) e velocidades das estações que a compõem. Consequentemente, a posição de um ponto localizado na superfície sólida da Terra é expressa por [MCCARTHY,1996]:

$$[X_i] = [X_0] + [\dot{X}_0](t - t_0) + \sum [\Delta X_i(t)] \quad (22)$$

onde  $[\dot{X}_0] = [\Omega][X_0]$  é o vetor velocidade na época  $t_0$  devido ao movimento da placa (a IAG recomenda o modelo geofísico de placas litosféricas NNR-NUVEL-1A) e  $[\Omega]$  é dada na equação (10), conduzindo a:

$$[\Omega][X_0] = \begin{bmatrix} 0 & -\Omega_z & \Omega_y \\ \Omega_z & 0 & -\Omega_x \\ -\Omega_y & \Omega_x & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_0 \\ y_0 \\ z_0 \end{bmatrix} \quad (23)$$

Na equação (23),  $\Omega_x$ ,  $\Omega_y$  e  $\Omega_z$  são os vetores de rotação das placas continentais, segundo os eixos cartesianos. Os vetores  $[X_0]$  e  $[\dot{X}_0]$  são as coordenadas e velocidades na época  $t_0$  e  $[\Delta X_i]$  são correções tais como: as variações de maré da Terra sólida e o efeito de carga dos oceanos e atmosfera [TORGE, 1996], a serem consideradas.

No ajustamento de parâmetros, particularmente velocidades<sup>13</sup>, a orientação IERS deverá ser mantida em todas as épocas, garantindo o alinhamento na época de referência e a evolução temporal através da condição de “rede não rotante”. O centro de massa da Terra, origem do sistema, é determinado por técnicas que permitem avaliar a evolução temporal em um sistema terrestre. As observações VLBI podem ser referidas a um sistema geocêntrico adotando-se para uma estação a sua posição geocêntrica em uma época de referência, assim fornecida a partir de outra fonte de informação.

---

<sup>13</sup> São soluções geodésicas fornecidas através da combinação de coordenadas obtidas em diferentes épocas.

A escala é obtida por uma modelagem relativista apropriada [TORGE, 1996]. Isso é possível para o caso do VLBI e LLR que são normalmente modelados em uma rede baricêntrica. A orientação é definida adotando-se os parâmetros de orientação da Terra (EOPs) em uma época de referência.

A evolução do tempo na orientação será garantida usando a condição de *rede não rotante* com relação aos movimentos tectônicos horizontais sobre toda a Terra [TORGE, 1996].

## 2.6 MÉTODOS DE INTEGRAÇÃO DE REFERENCIAIS TERRESTRES

No contexto dos métodos de integração de sistemas de referência pode-se fazer uma distinção quanto à precisão requerida. Na maioria dos casos ocorre um comprometimento entre os resultados existentes e os que se quer integrar. Na verdade, o objetivo da integração é combinar as duas soluções da melhor forma possível, cabendo ao usuário saber qual procedimento que se conforma melhor às suas necessidades. Atualmente, os levantamentos locais podem ser integrados de três maneiras. Na forma tradicional, ou seja, as coordenadas dos novos levantamentos locais são determinadas indiretamente, através de um ajustamento injuncionado às coordenadas das estações existentes. Outro método de integração é baseado em observações GPS através das técnicas de posicionamento absoluto ou relativo. Neste caso, os satélites desempenham o papel dos pontos de controle. Quando os dados são processados com efemérides transmitidas sabe-se que os resultados estarão referidos ao WGS84, enquanto se no processamento forem utilizadas efemérides precisas, os resultados estarão referidos ao ITRFyy. Em qualquer um dos casos de integração, deve-se analisar se a precisão esperada foi obtida. Efemérides precisas são coordenadas cartesianas dos satélites GPS, que são calculadas a partir de uma rede globalmente distribuída com estações de rastreo que têm suas posições geocêntricas conhecidas com uma precisão estimada de 5 cm. Um terceiro, método de precisão inferior, é realizado através da aplicação de parâmetros de transformação. Conforme o exposto acima, pode-se citar como métodos de integração [CRAYMER, 1998]:

1. O ajustamento de observações, que através das injunções pode ser feita a conexão direta às estações de controle existentes;
2. Efemérides de satélites (transmitidas e precisas);
3. Parâmetros de transformação.

O método tradicional de integração de levantamentos locais, é conectá-los diretamente às estações de controle existentes. O procedimento é iniciado através de um ajustamento de injunção mínima. As coordenadas dos pontos envolvidos num levantamento local (incógnitas do ajustamento) são determinadas indiretamente a partir de coordenadas conhecidas dos pontos de controle existentes. Toda cautela deve ser tomada para garantir que os pontos de controle estejam no sistema de referência correto e sejam de boa qualidade. Um bom indicador de qualidade das coordenadas, são seus desvios padrão. Sendo assim, é mais conveniente e preciso integrar um levantamento local GPS a uma estrutura de alta precisão, como por exemplo as estações da RBMC. Observações GPS (código e da portadora) são disponibilizadas pelo IBGE para a todas as estações da RBMC em formato RINEX, a um intervalo de observação de 15 segundos. A próxima etapa é desenvolver uma análise estatística nos resultados do ajustamento, tais como: variância a posteriori, resíduos e elipses de erro. O objetivo é examinar a qualidade da densificação, ou seja, garantir a sua consistência e confiabilidade. Cabe aqui que sejam feitos esclarecimentos sobre a qualidade dos resultados.

## 2.7 ACURÁCIA X PRECISÃO

Quando qualquer tipo de observação é realizada, faz-se importante quantificar a sua qualidade. Por exemplo, se uma coordenada foi determinada por GPS é necessário quantificar o seu grau de certeza. Vários termos são usados para quantificar as precisões das observações, sendo os termos mais comuns a precisão e acurácia. A acurácia se refere a proximidade de uma estimativa, ou observação, está do seu valor verdadeiro, mas desconhecido, estando vinculada aos erros aleatórios e grosseiros. Enquanto a precisão, se refere à proximidade de uma estimativa, ou observação está da sua média, estando vinculada aos erros aleatórios. É possível se obter alta precisão com baixa acurácia e vice versa, como demonstra a FIGURA 9. Nesta figura, a cruz e o círculo correspondente, representam a posição verdadeira e a acurácia

da entidade medida, enquanto cada ponto cinza representa uma medição individual (a precisão) [GSD, 1995].

O desvio padrão, representado pelo símbolo  $\sigma$ , é usado para quantificar a dispersão em torno da média das observações. A exatidão, ou certeza de uma solução, pode ser quantificada por múltiplos do desvio padrão ou por uma determinada função de probabilidade de distribuição das observações. A função de probabilidade de distribuição normal fornece o relacionamento entre os dois (observações e modelo matemático de distribuição), como por exemplo, uma observação qualquer dentro de um conjunto tem 95,45% de probabilidade de estar contida em  $\pm 2\sigma$  da média. O desvio padrão é a medida de precisão mais utilizada. A precisão absoluta é a proximidade da coordenada de uma estação com relação ao seu referencial, e a precisão relativa é um indicador da qualidade na medida entre dois pontos, que no caso poderão ser as linhas de base GPS observadas através do posicionamento relativo [GSD, 1996].

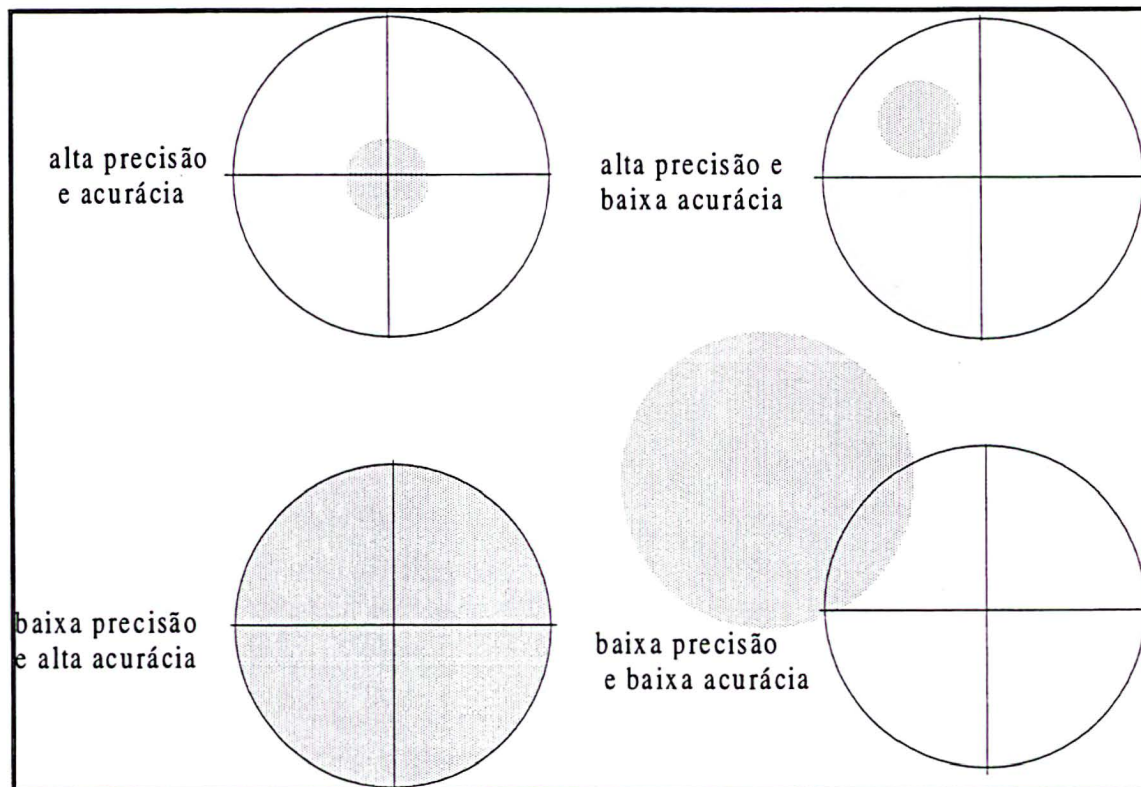


FIGURA 9 - PRECISÃO X ACURÁCIA.



No caso dos resultados não serem satisfatórios, deve-se analisar a existência de erros grosseiros nas observações ou a ponderação inadequada nas observações, ou ainda a presença de erros sistemáticos entre o controle e a densificação, como por exemplo problemas de escala. O próximo passo é incluir no ajustamento as estações de controle existentes na densificação. Nesta etapa é feita uma análise externa do comportamento da densificação com o que existe na área.

As transformações de coordenadas referidas à dois sistemas de referência terrestres são diretas, desde que as diferenças entre eles sejam conhecidas. O procedimento de transformação de coordenadas é apenas uma aproximação para aquelas coordenadas que deveriam ter sido ajustadas no novo referencial, não afetando a precisão relativa. A precisão relativa das posições de uma rede GPS são mantidas porque a transformação é similar para todos os pontos. Entretanto, a precisão absoluta de um conjunto de coordenadas transformadas depende da precisão do método de transformação adotado. Num processo menos preciso de integração, as transformações entre sistemas de referência terrestres requerem modelagem das diferenças de materializações. Neste caso a precisão relativa das coordenadas é degradada com o objetivo de se preservar o relacionamento da materialização entre os referenciais.

## CAPÍTULO 3 - AJUSTAMENTO DA REDE GEODÉSICA BRASILEIRA AO SIRGAS

Os métodos clássicos de ajustamento de redes geodésicas horizontais envolvem preliminarmente reduções das entidades observadas, como por exemplo, distâncias, ângulos horizontais e azimutes astronômicos à uma superfície matematicamente definida. O ajustamento, neste caso, é realizado em uma superfície de referência escolhida como a de melhor adaptação na região em questão. Além disso, os métodos clássicos têm o inconveniente de fornecer solução de redes planimétricas e verticais separadamente. O ajuste só pode ser realizado em um espaço bidimensional (apesar do ajustamento depender das altitudes geométricas), impossibilitando assim, a inclusão de observações oriundas de técnicas espaciais [NOAA, 1989].

Decorrente dos problemas abordados acima, bem como a aplicação sistemática da técnica GPS nos levantamentos geodésicos, verificou-se a necessidade da adoção de um *software* que possibilitasse o ajustamento de todas as observações de forma simultânea. O *software* escolhido com este objetivo foi o GHOST, utilizado pelo Canadá no Projeto *North American Datum of 1983* (NAD-83). Ele é formado por um conjunto de programas desenvolvidos em linguagem FORTRAN [BEATTIE, 1987], com o objetivo de desenvolver ajustamentos em redes continentais, tal como a brasileira. O GHOST tem como principais características a utilização da modelagem tridimensional para o ajuste por mínimos quadrados e o emprego da técnica de *Helmert Blocking* na decomposição de redes geodésicas. Na adoção desta modelagem faz-se necessário o conhecimento das informações que efetuam a ligação entre os sistemas topocêntricos locais (GL e AL), denominadas de componentes do desvio da vertical e as ondulações geoidais. Com este objetivo será feita uma breve introdução dos atuais modelos do geopotencial adotados pela comunidade internacional e um estudo comparativo entre eles.

Este capítulo tem por objetivo abordar a metodologia aplicada no ajustamento da rede geodésica brasileira ao SIRGAS, bem como os procedimentos preliminares englobando a

preparação e validação das observações para o ajuste e a avaliação dos resultados finais. Inicialmente serão apresentadas as características do *software* e seu modelo matemático.

### 3.1 O SOFTWARE GHOST

Este *software* foi utilizado pelos canadenses no projeto NAD83 e no Brasil no reajustamento da rede planimétrica (projeto REPLAN) concluído em 1996. Para que todos processos do ajustamento sejam realizados de forma eficiente e otimizada o GHOST faz uso das técnicas descritas a seguir:

O GHOST utiliza o modelo matemático da geodésia tridimensional com altitudes fixas, conhecido também pela denominação de modelo tridimensional de altitudes controladas, apresentado por Vincenty e Steeves [NOAA, 1989]. A opção pelo modelo matemático tridimensional foi feita em decorrência do grande esforço computacional exigido pelos sistemas que utilizam a modelagem clássica (bidimensional), nos quais as observações são reduzidas à superfície matemática (elipsóide) antes do ajuste. O modelo matemático utilizado no ajustamento proposto é baseado no relacionamento entre sistemas de coordenadas tridimensionais, com uma certa particularidade com respeito às altitudes. Sendo assim, as estações que não possuem informações referentes à componente vertical (desníveis), tem as suas altitudes (iniciais) fixas. Quando a componente vertical é observada, como é o caso de altitudes Doppler e GPS, as três componentes são introduzidas no ajustamento como incógnitas. Deste modo, a proposta desta modelagem é que, tanto as observações de origem terrestre quanto as de origem espacial sejam combinadas em um único ajustamento, sendo estimadas as coordenadas horizontais das estações estabelecidas por procedimentos clássicos (técnicas terrestres). Este modelo não impõe nenhuma restrição quanto ao comprimento das linhas de base. É exigência do modelo que sejam conhecidas a latitude e longitude astronômicas para todas as estações. Esta exigência também é válida para equações da geodésia clássica, quando são rigorosamente aplicadas. As informações astronômicas podem ser expressas em latitude e longitude (astronômicas) ou então através das componentes do desvio da vertical (meridiana e primeiro vertical). A ondulação geoidal completa o relacionamento entre geóide-elipsóide para as corretas reduções.

O sistema GHOST adota, como método de ajustamento, o método paramétrico, no qual é necessário atribuir, para todas as estações, um valor inicial de coordenadas.

Na solução das equações normais é empregado o método de Cholesky [GEMAEL, 1994], associado a técnica de *Helmert Blocking*, a qual subdivide os grandes sistemas de equações em vários sub-sistemas e, conseqüentemente, em pequenas soluções [BEATTIE, 1987]. O algoritmo proposto pelo método de Cholesky no processo de solução direta da matriz das equações normais exclui a necessidade de inversão da matriz, diminuindo assim o tempo de processamento. Considerando também a característica de simetria da MVC, opera-se somente com a parte superior da mesma, reduzindo o espaço de armazenamento.

O sistema GHOST possui duas opções para o processamento de redes geodésicas: a) ajustamento padrão; b) ajustamento por *Helmert Blocking*. O ajustamento padrão é aplicado em redes de pequeno e médio porte, onde não se justifica a aplicação da decomposição de redes. Um ajustamento através da técnica de *Helmert Blocking* é justificado em redes de caráter continental. Sendo assim, antes do processamento, a rede é dividida em pequenas redes ou blocos através de um esquema previamente planejado. Dentro de cada bloco são identificadas as estações "internas" aos blocos e as estações de "junção", as quais possuem observações que fornecem as ligações entre os blocos. As estações de junção são determinadas no processo de solução direta, enquanto as estações internas são determinadas no processo inverso, conhecido também por retrosolução.

A utilização dos algoritmos de *Cuthill-McKee e Bankers* [BEATTIE, 1987] no processo de redução das equações normais tem como objetivo elaborar uma nova ordenação dos elementos da matriz, de forma que sejam eliminados os elementos nulos das operações matemáticas e, conseqüentemente, reduzir o tempo de processamento na obtenção da solução direta.

Outra vantagem do GHOST, objetivando a redução de tempo no processamento, é a elaboração de arquivos de trabalho no formato binário de acesso direto.

### 3.2 MODELO MATEMÁTICO DA GEODÉSIA TRIDIMENSIONAL

O modelo matemático da geodésia tridimensional pode ser usado no ajustamento de redes clássicas, sendo que as altitudes e coordenadas astronômicas são quantidades fixas. Este método é simples e mais eficiente do que qualquer método clássico [VINCENTY, 1980], na medida em que ele usa as quantidades observadas sem qualquer redução à superfície matemática (elipsóide). Teoricamente é um método mais preciso na medida em que não existe nenhuma restrição quanto ao comprimento das distâncias observadas. Entretanto as latitudes e longitudes astronômicas são necessárias para todas estações. Se não forem observadas, devem ser obtidas através de interpolação em um modelo do geopotencial. Todas observações são qualificadas através de um peso *a priori*.

Considerando os relacionamentos entre referenciais abordados no capítulo 2, o ajustamento procede da seguinte forma [STEEVES, 1984]:

1. Sejam as coordenadas geodésicas preliminares de uma estação qualquer expressas em latitude  $\phi_i$ , longitude  $\lambda_i$  e altitude elipsoidal  $h_i$ , todas referidas a um elipsóide de referência. Para estimativa dos coeficientes das equações de observação, as coordenadas geodésicas devem ser convertidas para cartesianas através da formulação apresentada na seção 2.1.2.
2. Posteriormente, define-se a relação entre os sistemas AL e GL, o qual permite uma inclusão implícita das latitudes e longitudes astronômicas observadas. Para cada estação também é necessária a latitude  $\Phi_i$  e longitude  $\Lambda_i$  astronômica, calculadas através das seguintes relações:

$$\Phi_i = \phi_i + \xi_i \quad \text{e} \quad \Lambda_i = \lambda_i + \eta_i / \cos \phi_i \quad (24)$$

Onde  $\xi_i$  e  $\eta_i$  são as componentes meridiana e primeiro vertical do desvio da vertical. As quantidades  $\Phi_i$  e  $\Lambda_i$  (corrigidas do movimento do pólo) e as componentes do desvio da

vertical  $\xi_i$  e  $\eta_i$  são quantidades de superfície. Os senos e cossenos pertencentes aos coeficientes das equações de observação (a serem apresentadas), são armazenados em arquivos e atualizados a cada iteração do ajustamento, da seguinte forma:

$$\begin{aligned}
 \text{sen } \Phi_{new} &= \text{sen } \Phi_{old} + \cos \Phi_{old} \cdot \delta\phi \\
 \cos \Phi_{new} &= \cos \Phi_{old} - \text{sen } \Phi_{old} \cdot \delta\phi \\
 \text{sen } \Lambda_{new} &= \text{sen } \Lambda_{old} + \cos \Lambda_{old} \cdot \delta\lambda \\
 \cos \Lambda_{new} &= \cos \Lambda_{old} - \text{sen } \Lambda_{old} \cdot \delta\lambda
 \end{aligned} \tag{25}$$

Sendo os valores com sub-índice *old*, obtidos na iteração *i-1* e os valores com sub-índice *new* a serem usados na iteração *i*. As correções  $\delta\phi$  e  $\delta\lambda$  são calculadas durante o ajustamento, conforme apresentado no seguinte passo.

3. A forma explícita da equação (6) apresentada no capítulo 2, é dada pelas fórmulas (26), (27) e (28), sendo as quantidades usadas para o cálculo dos coeficientes da matriz das equações de observação [GEMAEL, 1994]:

$$u_1 = -\text{sen } \Phi_1 (\cos \Lambda_1 \Delta X + \text{sen } \Lambda_1 \Delta Y) + \cos \Phi_1 \Delta Z \tag{26}$$

$$v_1 = -\text{sen } \Lambda_1 \Delta X + \cos \Lambda_1 \Delta Y \tag{27}$$

$$w_1 = \cos \Phi_1 (\cos \Lambda_1 \Delta X + \text{sen } \Lambda_1 \Delta Y) + \text{sen } \Phi_1 \Delta Z \tag{28}$$

$$\text{O vetor resultante das componentes horizontais é dado por: } r_1^2 = u_1^2 + v_1^2 \tag{29}$$

As fórmulas (30) e (31) fazem a transformação das coordenadas cartesianas do AL em curvilíneas:

$$S^2 = \Delta X^2 + \Delta Y^2 + \Delta Z^2 \tag{30}$$

$$A_1 = \tan^{-1}(v_1 / u_1) \tag{31}$$

Como os parâmetros incógnitos de interesse no ajustamento são as coordenadas ajustadas das estações, o seu valor ajustado em cada iteração será dado pelo valor das coordenadas na iteração anterior (ou valor inicial), acrescentado das correções estimadas, representadas em um AL por  $\delta u$ ,  $\delta v$  e  $\delta w$ . Estas correções são vinculadas ao GL da seguinte forma :

$$\begin{bmatrix} \delta u_1 \\ \delta v_1 \\ \delta w_1 \end{bmatrix} = R_{A1} \begin{bmatrix} \delta \Delta X \\ \delta \Delta Y \\ \delta \Delta Z \end{bmatrix} \quad (32)$$

$$\begin{bmatrix} \delta \Delta X \\ \delta \Delta Y \\ \delta \Delta Z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \delta X_2 \\ \delta Y_2 \\ \delta Z_2 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \delta X_1 \\ \delta Y_1 \\ \delta Z_1 \end{bmatrix} \quad (33)$$

$$\text{Sendo: } \begin{bmatrix} \delta X_2 \\ \delta Y_2 \\ \delta Z_2 \end{bmatrix} = R_{G2}^T \begin{bmatrix} \delta x_2 \\ \delta y_2 \\ \delta h_2 \end{bmatrix} \quad \text{e} \quad \begin{bmatrix} \delta X_1 \\ \delta Y_1 \\ \delta Z_1 \end{bmatrix} = R_{G1}^T \begin{bmatrix} \delta x_1 \\ \delta y_1 \\ \delta h_1 \end{bmatrix} \quad (34)$$

Finalmente o ajustamento resultará em correções  $\delta x_i$ ,  $\delta y_i$  e  $\delta h_i$  (esta última calculada somente para estações onde forem estabelecidas as três componentes), referidas ao sistema GL que serão, posteriormente convertidas para  $\delta\phi$  e  $\delta\lambda$  da seguinte forma:

$$\begin{aligned} \delta\phi_i &= \delta x_i / (\rho_i + h_i) \\ \delta\lambda_i &= \delta y_i \cdot \sec\phi_i / (N_i + h_i) \end{aligned} \quad (35)$$

Onde  $\rho_i$  é o raio de curvatura da seção meridiana, dado pela fórmula:

$$\rho_i = a(1 - e^2) / (1 - e^2 \sin^2 \phi_i)^{3/2} \quad (36)$$

$$\text{Sendo } e^2 \text{ (primeira excentricidade) - } e^2 = (a^2 - b^2) / a^2 \quad (37)$$

a = semi-eixo maior do elipsóide

b = semi-eixo menor do elipsóide

### 3.2.1 Equações de observação para as observações terrestres

De posse das coordenadas cartesianas iniciais, para todas as estações da rede, e um conjunto de observações de diferentes naturezas (terrestre e espaciais), o problema é formar cada equação de observação, para o seu uso no ajustamento por variação de coordenadas. Sendo assim, a forma generalizada das equações de observação:

(a) Observações em um CTS:  $v = a_1 (\delta X_2 - \delta X_1) + a_2 (\delta Y_2 - \delta Y_1) + a_3 (\delta Z_2 - \delta Z_1) + K$  (38)

Onde  $v$  é o resíduo da observação,  $K$  é a diferença entre as coordenadas calculadas e o valor observado;  $\delta X$ ,  $\delta Y$  e  $\delta Z$  as incógnitas representando as mudanças das coordenadas em cada eixo (coordenadas preliminares – coordenadas ajustadas). Os coeficientes  $a_1$ ,  $a_2$  e  $a_3$  são expressos por:

$$a_1 = (v_1 \sin \Phi_1 \cos \Lambda_1 - u_1 \sin \Lambda_1) / r_1^2 \quad (39)$$

$$a_2 = (v_1 \sin \Phi_1 \sin \Lambda_1 - u_1 \cos \Lambda_1) / r_1^2 \quad (40)$$

$$a_3 = -v_1 \cos \Phi_1 / r_1^2 \quad (41)$$

Sendo que no caso de observações de distâncias, eles são expressos da seguinte forma:

$$a_1 = \Delta X / S ; \quad a_2 = \Delta Y / S \text{ e } \quad a_3 = \Delta Z / S \quad (42)$$

(b) Observações em um Sistema Local (horizontal) :

$$v = c_1 \delta x_1 + c_2 \delta y_1 + c_3 \delta x_2 + c_4 \delta y_2 + K \quad (43)$$

A forma generalizada tem três incógnitas por estação, sendo que as observações podem determinar somente duas ( $\delta x$  e  $\delta y$ ). Os índices 1 e 2 nas equações se referem às observações e correções nas estações 1 e 2. Entretanto, o procedimento para manter as altitudes inalteradas em cada iteração é adotar o valor zero para  $\delta h$ . Serão apresentadas a seguir as equações de observação terrestre (distância, azimute e direção horizontal) e seus coeficientes.

### Observações de distâncias

As observações de distâncias entram no ajustamento como distâncias medidas marco a marco. A forma linearizada da equação de observação de distância é ( $v_s$  é o resíduo):



$$v_s = a_1 \delta x_1 + a_2 \delta y_1 + a_3 \delta x_2 + a_4 \delta y_2 - S^0 \delta^k - \delta^c + K_s \quad (44)$$

$$\begin{aligned} a_1 &= -(u_1 + m_1 v_1) / S^0 \\ a_2 &= -(v_1 - m_1 u_1) / S^0 \\ a_3 &= -(u_2 + m_2 v_2) / S^0 \\ a_4 &= -(v_2 - m_2 u_2) / S^0 \end{aligned} \quad (45)$$

$$\text{Onde : } m_1 = \sin \Phi_1 (\sin \Lambda_1 X_1 / p_1 - \cos \Lambda_1 Y_1 / p_1) \text{ ou } m_1 = \sin \Phi_1 \sin(\Lambda_1 - \lambda_1) \quad (46)$$

$$p_1 = (X_1^2 + Y_1^2)^{1/2} \quad (47)$$

$$S^0 = (S^2 / S_{obs} + S_{obs}) / 2 \quad (48)$$

$$K_s = S^0 - S_{obs} - (1 + k^0) c^0 - k^0 S^0 \quad (49)$$

$S_{obs}$  = distância observada

$\delta^k$  = correção da diferença de escala

$\delta^c$  = correção “zero” (erro constante na medida da distância)

$K_s$  = erro de fechamento

$c^0$  e  $k^0$  = valores iniciais para correção zero e diferença de escala, respectivamente

O peso atribuído na observação de distância é dado por:  $1/\sigma_s^2$ , onde  $\sigma_s^2$  é a variância da observação de distância em  $m^2$ .

### Observação de Direção Horizontal

O valor da direção de entrada é a média do conjunto de observações feitas em posição direta e inversa, sem nenhuma redução (ex: ao elipsóide de referência).

$$v_{dir} = a_1 \delta x_1 + a_2 \delta y_1 + a_3 \delta x_2 + a_4 \delta y_2 - \rho'' \cdot \delta \Omega + K_{dir} \quad (50)$$

Onde  $v_{dir}$  corresponde ao resíduo e  $K_{dir}$  ao valor observado subtraído do calculado.

$$\begin{aligned} a_1 &= (v_1 - m_1 u_1) / r_1^2 \\ a_2 &= -(u_1 + m_1 v_1) / r_1^2 \end{aligned} \quad (51)$$

$$a_3 = (q_1 - m_2 q_2) / r_1^2$$

$$a_4 = (q_2 - m_2 q_1) / r_1^2$$

Onde:

$$\Delta\Lambda = \Lambda_2 - \Lambda_1 \quad (52)$$

$$q_1 = -v_1 (\cos \Phi_1 \cos \Phi_2 + \sin \Phi_1 \sin \Phi_2 \cos \Delta\Lambda) - u_1 \sin \Phi_2 \sin \Delta\Lambda \quad (53)$$

$$q_2 = u_1 \cos \Delta\Lambda - v_1 \sin \Phi_1 \sin \Delta\Lambda \quad (54)$$

$\delta\Omega$  = correção em orientação  $\Omega$  em radianos;

$$\rho'' = 206264.806$$

As incógnitas de orientação (método de Schreiber) não são eliminadas, mas resolvidas como parâmetros auxiliares. O valor inicial  $\Omega^0$  é calculado por:

$$\Omega^0 = \arctan(v_1 / u_1) - d_{or} \quad (55)$$

$d_1$  e  $c_1$  são valores para a direção da “origem de referência” (é aquela do conjunto de observações a de menor valor numérico) e  $d_{or}$  é o valor observado desta direção. O erro de fechamento  $K_{dir}$  é dado por:

$$K_{dir} = \arctan(v_1 / u_1) - d_{obs} - \Omega^0 \quad (56)$$

$d_{obs}$  = direção observada;

$\Omega^0$  = o valor inicial da orientação em cada iteração.

O peso de uma determinada direção é dado por  $1/\sigma_{dir}^2$ , onde  $\sigma_{dir}^2$  é a variância da direção em segundos ao quadrado.

### Observação do Azimute Astronômico

Presume-se que inicialmente, todas as observações astronômicas são corrigidas do movimento do pólo. Elas não serão reduzidas a azimutes geodésicos. A equação linearizada é:

$$v_{az} = a_1 \delta x_1 + a_2 \delta y_1 + a_3 \delta x_2 + a_4 \delta y_2 - \rho'' \delta \alpha + K_{az} \quad (57)$$

$\delta \alpha$  = correção para a incógnita orientação de azimuth  $\alpha$ . Ela decorre de um provável erro sistemático em orientação. Os coeficientes  $a_i$  são os mesmos utilizados nas direções horizontais. O erro de fechamento  $K_{az}$  é dado por:

$$K_{az} = \arctan(v_1 / u_1) - AZ_{obs} - \alpha \quad (58)$$

Onde  $\alpha$  é o valor inicial de orientação em cada iteração. As unidades de  $\delta \alpha$  são em radianos. As unidades de  $K_{az}$  estão em segundos de arco. O peso do azimuth observado é dado por  $1/\sigma_{az}^2$ , onde  $\sigma_{az}^2$  é a variância do azimuth observado, em unidades de segundos de arco ao quadrado.

### 3.2.2 Equações de observação para as observações espaciais (Doppler e GPS)

Considera-se que para ambas observações, Doppler e GPS, as coordenadas ou as diferenças de coordenadas estejam referidas a uma aproximação do CTS (geocêntrico, tridimensional e cartesiano).

#### Observação de posição - Doppler

As equações de observação das posições observadas  $X_i$ ,  $Y_i$  e  $Z_i$ , pertencente a um grupo de estações, das quais é conhecida a MVC completa, é da forma:

$$\begin{bmatrix} v_x \\ v_y \\ v_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \delta X \\ \delta Y \\ \delta Z \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \delta X_0 \\ \delta Y_0 \\ \delta Z_0 \end{bmatrix} - U \begin{bmatrix} \omega_x \\ \omega_y \\ \omega_z \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} ds_k + \begin{bmatrix} X - X^{obs} \\ Y - Y^{obs} \\ Z - Z^{obs} \end{bmatrix} \quad (59)$$

$$U = \begin{bmatrix} 0 & -Z & Y \\ Z & 0 & -X \\ -Y & X & 0 \end{bmatrix} \quad (60)$$

Onde :

$v_X$ ,  $v_Y$  e  $v_Z$  são os resíduos;

$X^{obs}$ ,  $Y^{obs}$  e  $Z^{obs}$  são os valores observados;

$X$ ,  $Y$  e  $Z$  são os valores calculados;

$ds$  é a correção de escala Doppler (injuncionada a zero na última iteração);

$\delta X_0$ ,  $\delta Y_0$  e  $\delta Z_0$  são variações correspondentes às componentes de translação geocêntrica;

$ds$  é o parâmetro de correção em escala.

### Observação de diferença de posição - GPS

As  $3(n-1)$  observações de diferenças de posições para um conjunto de  $n$  estações será dado da seguinte forma (considera-se o fornecimento da MVC completa):

$$[\Delta X_{1,2} \Delta Y_{1,2} \Delta Z_{1,2} \Delta X_{1,3} \Delta Y_{1,3} \Delta Z_{1,3} \dots \Delta X_{1,n} \Delta Y_{1,n} \Delta Z_{1,n}]$$

$$\begin{bmatrix} v\Delta X_{12} \\ v\Delta Y_{12} \\ v\Delta Z_{12} \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} \delta X_1 \\ \delta Y_1 \\ \delta Z_1 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \delta X_2 \\ \delta Y_2 \\ \delta Z_2 \end{bmatrix} - \Delta U \begin{bmatrix} \delta\omega_X \\ \delta\omega_Y \\ \delta\omega_Z \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \Delta X_{12} \\ \Delta Y_{12} \\ \Delta Z_{12} \end{bmatrix} ds + \begin{bmatrix} \Delta X_{12} - \Delta X_{12}^{obs} \\ \Delta Y_{12} - \Delta Y_{12}^{obs} \\ \Delta Z_{12} - \Delta Z_{12}^{obs} \end{bmatrix} \quad (61)$$

Onde :

$v\Delta X$ ,  $v\Delta Y$  e  $v\Delta Z$  são os resíduos das diferenças em coordenadas;

$\Delta X$ ,  $\Delta Y$ , e  $\Delta Z$  são as diferenças entre as coordenadas calculadas;

$\delta X$ ,  $\delta Y$  e  $\delta Z$  são as variações em coordenadas;

$\Delta U = U_1 - U_2$ ;

$\Delta X^{obs}$ ,  $\Delta Y^{obs}$ , e  $\Delta Z^{obs}$  são as diferenças entre as coordenadas observadas;

$\delta\omega_X$ ,  $\delta\omega_Y$  e  $\delta\omega_Z$  são as variações referentes as rotações em torno dos eixos X, Y e Z;

$ds$  é o parâmetro de correção em escala.

Conforme visto anteriormente, a cada tipo de observações corresponderá um formato específico para a equação de observação. Assim sendo, as equações de observação segundo o método dos parâmetros, apresentadas nesta seção na forma linearizada, assumem a forma generalizada em um sistema redundante de observações:

$${}_nV_1 = {}_nA_u {}_uX_1 + {}_nL_1 \quad (62)$$

Sendo  $n$  = número observações e  $u$  = número de incógnitas (3 ou 2 para cada estação);

$V$  = vetor( $n \times 1$ ) dos resíduos;

$A$  = matriz dos coeficientes das incógnitas ( $n \times u$ ). Seus elementos são os coeficientes das equações de observação (ex:  $a_1, a_2, a_3, a_4$  das equações de azimuth e direção horizontal);

$X$  = vetor ( $u \times 1$ ) das correções aplicadas ao valor inicial das incógnitas (coordenadas das estações). Representado nas equações de observação por  $\delta x$  e  $\delta y$ , para equações referentes aos dados terrestres e  $\delta X, \delta Y$  e  $\delta Z$  para as equações referente às observações Doppler e GPS.

$L = L_0 - L_b$  ( $n \times 1$ ). Sendo,  $L_0$  o vetor das observações calculadas através do problema indireto da geodésia e  $L_b$  o vetor dos valores observados, representado nas equações de observação pelo erro de fechamento  $K$ .

$X_0$  = vetor ( $u \times 1$ ) dos valores iniciais das incógnitas;

$X_a$  = vetor ( $u \times 1$ ) das incógnitas ajustadas;

$P$  = matriz peso ( $n \times n$ ) é composta pelo inverso da MVC das observações.

A solução de um sistema de equações normais é dado pelas seguintes fórmulas:

$$X = N^{-1}U \quad (63)$$

$$N = A^T P A \text{ e } U = A^T P L \quad (64)$$

Onde  $X$  é o vetor de correção das incógnitas, que somado aos valores iniciais destas, fornece as coordenadas ajustadas da seguinte forma:

$$X_a = X_0 + X \quad (65)$$

Entretanto, as informações de controle são introduzidas adicionalmente ( $V_2 = A_2 X + L_2$ ) em um ajustamento através de injunções da seguinte forma [LUGNANI, 1987]:

$$V = X_{ca} - X_c \quad (65.a)$$

$X_{ca}$  são as coordenadas das estações de injunção estimadas no ajustamento e  $X_c$  são as coordenadas das mesmas estações fornecidas como observações. Neste caso a matriz  $A_2$  é uma matriz identidade, sendo assim,  $N_2$  e  $U_2$  são  $P_2$  e  $P_2 L$ . A matriz  $P_2$ , possui elementos somente na diagonal, formado pelos desvios padrão atribuídos às coordenadas injuncionadas. Após a formação de  $N$  e  $U$ , localiza-se os elementos da estação que está sendo injuncionada em  $N$  e  $U$ , os quais serão adicionados aos elementos de  $P_2$  e  $P_2 L_2$ , respectivamente.

### 3.3 PREPARAÇÃO DOS DADOS PARA O AJUSTAMENTO

Nesta seção são apresentadas todas as observações que participaram do ajustamento da rede geodésica, bem como os seus respectivos pesos.

#### 3.3.1 Observações terrestres - rede clássica

Todas as observações referentes à rede clássica utilizadas no reajustamento da rede planimétrica – REPLAN, concluído pelo IBGE em 1996, participam do ajustamento no SIRGAS. O projeto REPLAN foi um grande desafio para o Departamento de Geodésia do IBGE, o qual teve como principais objetivos [SILVA, 1985]:

- (a) Ajustar toda a rede de uma só vez, corrigindo as eventuais distorções induzidas pelas técnicas de ajustamento empregadas no passado;
- (b) Submeter todas as observações a um processo de crítica rigorosa que possa garantir a exclusão de observações inconsistentes;
- (c) Ajustar todas as observações devidamente reduzidas à superfície de referência;
- (d) Introduzir novas observações e injunções no sentido de assegurar à rede um padrão de qualidade mais preciso e homogêneo. Neste aspecto foram introduzidas observações oriundas do Doppler e GPS, disponíveis naquela época.

Entretanto, não fizeram parte deste trabalho as etapas referentes ao armazenamento e validação das observações da rede clássica. Ainda com o REPLAN ficou a atribuição de detecção e eliminação de erros grosseiros ainda existentes, verificação na integração das observações e avaliação dos valores estimados para os desvios padrão. Com respeito à ponderação destas observações, foram adotados valores que dependem da metodologia e instrumental usado [IBGE, 1983], conforme apresentados na TABELA 8. Informações complementares sobre as observações da rede clássica, podem ser encontradas no *Relatório do Ajustamento da Rede Planimétrica do Sistema Geodésico Brasileiro* [IBGE, 1996].

TABELA 8 - PONDERAÇÕES ADOTADAS PARA AS  
OBSERVAÇÕES DA REDE CLÁSSICA.

Observação	Desvio Padrão
Direção horizontal	3ppm (0.61879")
Distância	1ppm (1 cm)
Azimute astronômico	1ppm (0.20626")

### 3.3.2 Observações espaciais – Doppler e redes GPS

No período 1973-1991, IBGE fez uso do posicionamento geodésico por satélites do sistema TRANSIT, especialmente em áreas de difícil acesso, como por exemplo na Região Amazônica. O método observacional para a obtenção das coordenadas das estações foi o posicionamento isolado ou absoluto. A fim de se obter melhores resultados para as observações DOPPLER, estas foram pós-processadas com o programa GEODOP V [GODOY et al., 1991a] adotando-se efemérides precisas. Para este ajustamento apenas 179 estações DOPPLER foram incluídas, as quais são coincidentes com estações da rede clássica. Estas observações assumem o papel de injunções no ajustamento, com pesos provenientes da MVC dos parâmetros fornecida no seu processamento. A única rede de translocação (técnica de posicionamento relativo aplicado às observações Doppler) que participou do ajustamento está localizada na Amazônia, entre os paralelos 16° S, 2° S e meridianos 62° W, 46° W [GODOY et al, 1991b]. Esta rede é composta por 14 pontos e seus extremos são coincidentes com quatro pontos da rede de triangulação, nos quais também foram determinadas coordenadas através da técnica de posicionamento isolado.

A tecnologia GPS começou a ser utilizada sistematicamente pelo IBGE em 1991. A primeira experiência prática foi o projeto internacional GIG91. Até o final de 1998 a Rede Nacional GPS (vide FIGURA 10) era composta por 669 estações. Entretanto, o processamento das observações sofreram um tratamento diferenciado no decorrer deste período. Até 1994 um total de 187 estações GPS foram processadas com o *software* TRIMVEC Plus, versão D, utilizando efemérides transmitidas, implicando assim na obtenção de resultados referidos à versão original do sistema WGS84. As observações GPS posteriores

a 1994 foram processadas com o software Bernese versão 4.0, utilizando efemérides precisas IGS, o que implica referir os resultados ao sistema IRTFyy.

Nos dois casos as coordenadas das estações e a sua respectiva MVC foram gerados na solução final do processamento das campanhas GPS, informações estas, a serem utilizadas como entrada no ajustamento global. As correlações matemáticas (entre as observações GPS) foram estimadas somente para campanhas processadas no software Bernese. Para elaboração do arquivo de entrada do ajuste, os dados de cada campanha individual foram transformados para o formato do *software* GHOST. Com o objetivo de analisar a precisão interna das campanhas, foram efetuados ajustamentos fixando somente uma estação, conhecido por ajustamento de injunção mínima. A variância *a posteriori* obtida foi usada como fator multiplicador aplicado na MVC da campanha GPS. Em cada campanha este procedimento foi repetido e em uma segunda etapa os dados foram combinados em um ajustamento final. Para a integração SIRGAS participam um total de 1777 linhas de base GPS.



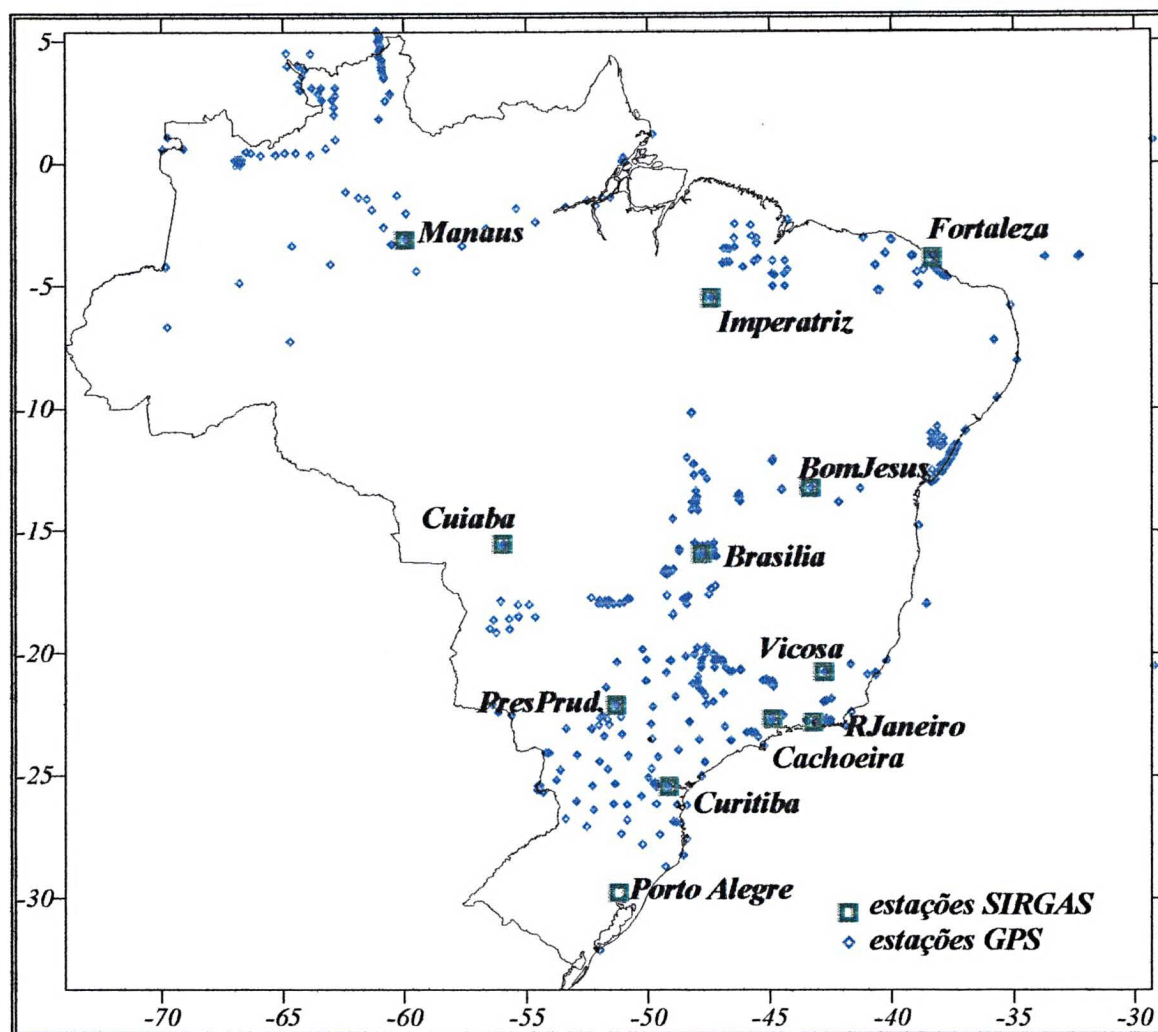


FIGURA 10 - REDE NACIONAL GPS E ESTAÇÕES SIRGAS/RBMC.

### 3.4 ESTUDO PARA A ADOÇÃO DE UM MODELO DO GEOPOTENCIAL NO AJUSTAMENTO

Em 1996, quando foi concluído o ajuste global em SAD69 as ondulações geoidais utilizadas, foram as fornecidas pelo modelo geoidal oficial (até hoje utilizado) para o Brasil, versão 1992. Este modelo geoidal 1992 foi gerado através do modelo do geopotencial GEM-T2 (Satellite Potential Coefficient Model GEM-T2) [BLITZKOW et al., 1992] com algumas incorporações de dados terrestres (521 ondulações geoidais observadas, mediante à observações GPS em referências de nível - RRNN) e gerada uma malha de 30'x 30' para fins de interpolação. Segundo comparações feitas entre as ondulações obtidas pelo GEM-T2 e as ondulações geoidais observadas, obteve-se um valor médio de 1,9 m, com valor máximo de 6

existem ondulações geoidais observadas. As ondulações geoidais estão referidas ao sistema SAD69 através dos seguintes parâmetros de translação [FORTES et al.,1989]:

$$T_x = 66.87 \text{ m}$$

$$T_y = -4.37 \text{ m}$$

$$T_z = 38.52 \text{ m}$$

Para o ajustamento da rede geodésica no sistema SIRGAS faz-se necessária a adoção destas informações referidas a um sistema geocêntrico. Novos modelos do geopotencial, tais como, OSU91A (Potential Coefficient Model OSU91A) e EGM96 (Earth Gravitational Model 1996) de grau e ordem 360 com boa acurácia a nível mundial vieram beneficiar os usuários que aplicam o GPS no posicionamento geodésico, obtendo-se assim valores confiáveis da altitude ortométrica através dos valores das ondulações. Oficialmente o Brasil ainda não conta com um modelo geoidal referido a um sistema geocêntrico. Estudos estão sendo feitos para que em breve seja adotado um novo modelo geoidal baseado em modelos mais recentes do geopotencial (componentes de longo e médio comprimento de onda) agregados à dados gravimétricos na integral de Stokes modificada (componentes de médio comprimento de onda).

A modelagem matemática do *software* de ajuste requer que cada estação tenha como informações observadas a latitude e longitude astronômica, caso contrário estes valores devem ser substituídos por valores interpolados da ondulação geoidal e componentes do desvio da vertical, obtidos através de modelos do geopotencial. Este procedimento é necessário para a redução das coordenadas geodésicas em astronômicas e vice-versa. Considerando que apenas 5% da rede clássica possui valores das componentes do desvio da vertical obtidos pelo método astro-geodésico e agregada ao fato da última versão do modelo geoidal brasileiro ser baseado no modelo do geopotencial GEMT2, decidiu-se então gerar estas informações através de um modelo do geopotencial utilizado atualmente pela comunidade internacional.

Pretende-se fazer nesta seção um estudo comparativo entre os dois mais recentes modelos do geopotencial, o OSU91A e EGM96 para que seja adotado um deles no ajustamento.

### 3.4.1 Modelo do geopotencial OSU91A

O modelo OSU91A foi desenvolvido pela Ohio State University por R.Rapp e N.Pavlis em 1991. Os coeficientes do grau 2 a 50 foram gerados usando o modelo GEMT2, combinado com anomalias gravimétricas médias espaçadas de  $1^\circ$  e dados altimétricos da superfície dos oceanos gerados pelo Geosat. As anomalias da gravidade terrestres foram combinadas com anomalias estimadas geofisicamente (*fill-in anomalies*<sup>1</sup>). Os coeficientes de grau 51 a 360 foram obtidos a partir do GEM-T2 combinados com anomalias da gravidade espaçadas de  $30'$  [RAPP, 1991]. As anomalias ajustadas resultantes da combinação acima, foram então utilizadas na determinação do conjunto completo de coeficientes até o grau e ordem 360, bem como do respectivo desvio padrão para cada coeficiente, obtidos do ajustamento por mínimos quadrados [PESSOA, 1997]. O desvio padrão estimado ( $1\sigma$ ) para os valores das ondulações geoidais no OSU91A é da ordem de 26 cm para áreas oceânicas; 38 cm em área terrestre com uma boa cobertura de dados da gravidade; 56 cm em área terrestre com fraca cobertura de dados da gravidade e 200 cm em área terrestre onde não existem dados da gravidade.

Para o cálculo das quantidades gravimétricas (componentes da deflexão da vertical, ondulação geoidal, perturbação da gravidade e anomalia da gravidade) baseadas nos coeficientes do modelo OSU91A referidos ao elipsóide GRS80, foi utilizado o programa TSCHERN, desenvolvido em linguagem FORTRAN por C. Tscherning [TCHERNING et al., 1983]. Este programa adota o algoritmo de Clenshaw e tem como opções de entrada, as seguintes informações:

- grau dos coeficientes do geopotencial a ser calculado;
- remover ou não os harmônicos  $J_2, J_4$  e  $J_6$ ;
- modelo do geopotencial;

---

<sup>1</sup> Em locais onde não existem informações gravimétricas, é calculada uma anomalia teórica através de modelos geofísicos e de elevações do terreno.

- Os nomes dos arquivos de entrada (coordenadas para o cálculo das quantidades gravimétricas) e saída;
- quantidades que serão calculadas.

### 3.4.2 Modelo do geopotencial EGM96

O modelo EGM96 foi um trabalho realizado através da colaboração de três instituições: Ohio State University, National Imagery and Mapping Agency (NIMA) e National Aeronautics and Space Administration (NASA). É um modelo do geopotencial completo de grau e ordem 360, consistindo de uma solução composta por [NIMA,1997]:

- Combinação de dados de satélite- EGM96S+ dados de altimetria + dados terrestres até grau e ordem 70;
- Solução de bloco diagonal de grau 71 a 359;
- Solução de quadratura no grau 360.

Na elaboração do modelo foram utilizadas além do dados adotados pelo OSU91A, dados gravimétricos terrestres, principalmente da Europa Oriental e Ásia e novos dados altimétricos de satélites obtidos do TOPEX/POSEIDON e ERS-1.

No caso do modelo EGM96 as informações foram calculadas no programa F477. O F477 é um programa FORTRAN destinado ao cálculo das quantidades gravimétricas – anomalia da gravidade, ondulação geoidal, componentes do desvio da vertical em um ponto cujas coordenadas (latitude e longitude) são conhecidas. O programa utiliza dois arquivos, um contendo o conjunto de coeficientes (“completamente” normalizados) do modelo do potencial EGM96 e outro contendo os coeficientes de correção<sup>2</sup> dos harmônicos esféricos - “CORRCOEF”, ambos gerados até o grau e ordem 360. Ele trabalha com constantes do EGM96 e aquelas do sistema WGS84 (G873). A ondulação é referida ao elipsóide WGS84 em um sistema livre dos efeitos de marés.

---

<sup>2</sup> Estas correção transformam as anomalias de altura calculadas em ondulações geoidais, através da anomalia de Bouguer.

### 3.4.3. Comparações e análise estatística

As comparações feitas nesta seção abrangem dois aspectos:

- (a) A escolha de um modelo do geopotencial que apresentasse melhor resultado na transformação das observações do sistema AL em GL. A entidade utilizada nesta comparação foi a ondulação geoidal;
- (b) Mediante a escolha do modelo do geopotencial, foi realizada uma comparação, neste caso, entre as altitudes ortométricas obtidas por diferentes procedimentos e modelos, conduzindo também a uma avaliação do modelo atualmente em uso no Brasil.

Inicialmente foi feito um levantamento das RRNN que possuíam observações GPS ou DOPPLER. Nesta seleção foram utilizadas informações existentes no Banco de Dados do Departamento de Geodésia - IBGE e da tese de mestrado “*Geóide Gravimétrico Local em Área da Bacia do Paraná*” [PESSOA, 1997]. Participaram desta comparação cerca de 316 estações (216 estabelecidas por Doppler e 100 estabelecidas por GPS), conforme a distribuição geográfica apresentada na FIGURA 11. As coordenadas geodésicas das estações estabelecidas por DOPPLER foram processadas com efemérides precisas e posteriormente transformadas para WGS-84 através dos seguintes parâmetros [FORTES et al., 1989]:

$$TZ=4,5 \text{ m} \quad \alpha_z = -0,814'' \quad \text{e} \quad K_{(\text{fator de escala})} = -0,6 \text{ PPM}$$

As estações estabelecidas por GPS foram obtidas através do ajustamento da Rede Nacional GPS em WGS-84. De posse das ondulações calculadas (DOPPLER e GPS) e de seus respectivos valores determinados com os modelos, OSU91A e EGM96, calcularam-se as suas diferenças, obtendo-se os resultados estatísticos apresentados na TABELA 9. Conforme os resultados apresentados nesta tabela, o desvio padrão do modelo OSU91A possui uma melhor aproximação dos valores observados das ondulações. Estes resultados discordam do que se esperava como a melhor adaptação, o modelo EGM96, considerando que este é um refinamento do OSU91A. Considerando que os parâmetros estatísticos são muito similares, ,

ou seja, não existindo diferença com significância estatística entre os dois, optou-se pelo modelo EGM96 por fornecer valores máximo e mínimo menores que o OSU91A.

Outra avaliação foi realizada com o objetivo de se analisar a acurácia das ondulações obtidas através do mapa geoidal 1992 e EGM96. Com este objetivo foram comparadas as altitudes ortométricas<sup>3</sup> obtidas pelo nivelamento geométrico nas RRNN com altitudes ortométricas obtidas por GPS, aplicando-se o modelo geoidal 1992 e outra aplicando o EGM96. Nesta comparação foi utilizado um outro conjunto de dados composto por 133 estações GPS coincidentes com RRNN, informações estas fornecidas pelo IBGE. A diferença entre as altitudes ortométricas obtidas com os procedimentos mencionados, proporciona uma indicação da acuracidade dos modelos geoidais em questão. Analisando-se os resultados estatísticos na TABELA 10, verifica-se que existem discrepâncias significativas dos valores de média, máximo e mínimo entre os dois modelos em questão. Entretanto, o modelo EGM96 possui valores de máximo e mínimo, bem como a média inferiores aos proporcionados pelo modelo geoidal 1992, comprovando assim uma melhor acuracidade no modelo EGM96.

---

<sup>3</sup> As altitudes ortométricas calculadas pelo IBGE, incluem simplesmente a correção de não paralelismo das superfícies equipotenciais, não considerando os valores gravimétricos.

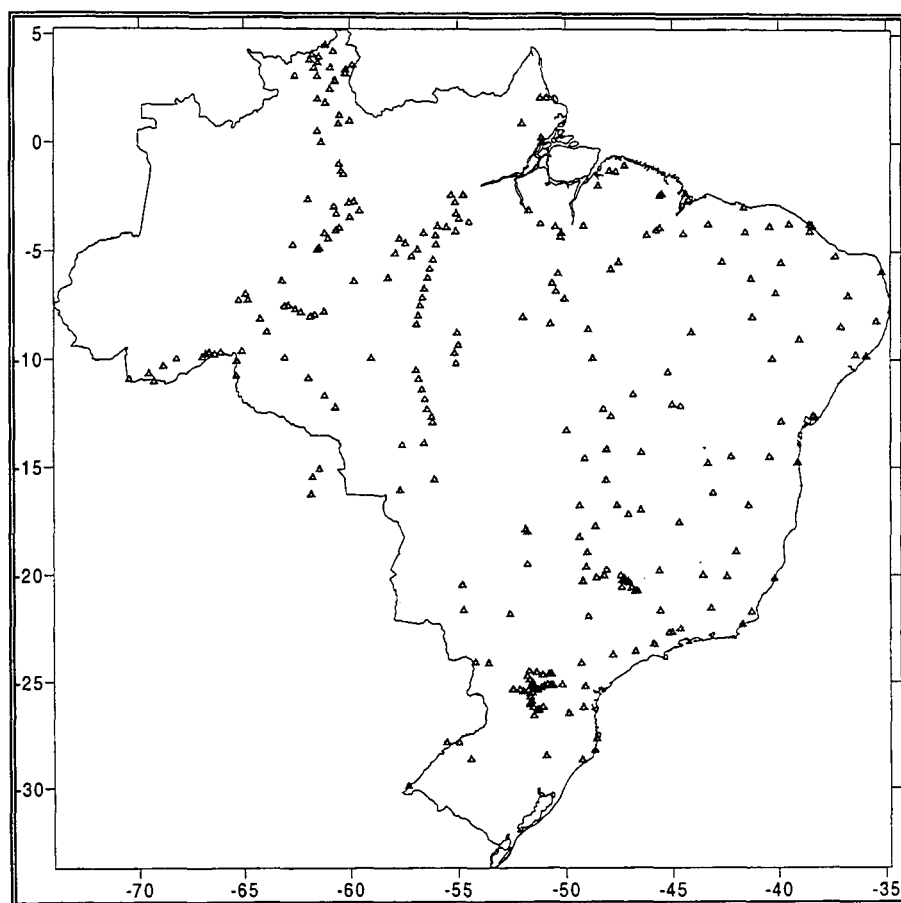


FIGURA 11 - DISTRIBUIÇÃO DAS ESTAÇÕES GPS/DOPPLER CONECTADAS AO NIVELAMENTO GEOMÉTRICO.

TABELA 9 - ESTATÍSTICA DAS DIFERENÇAS ENTRE AS ONDULAÇÕES OBSERVADAS E AS OBTIDAS ATRAVÉS DOS MODELOS DO GEOPOTENCIAL OSU91A E EGM96.

Estatística	DOP/GPS X OSU91A	DOP/GPS X EGM96
Média	-0,100 m	0,260 m
Desvio Padrão	2,01 m	2,02 m
Mínimo	-6,26 m	-4,97 m
Máximo	5,24 m	4,96 m

**TABELA 10 - COMPARAÇÃO ENTRE AS ALTITUDES ORTOMÉTRICAS OBTIDAS POR NIVELAMENTO GEOMÉTRICO COM AS ALTITUDES ORTOMÉTRICAS OBTIDAS ATRAVÉS DE GPS E ONDULAÇÃO GEOIDAL (MODELO GEOIDAL 1992 E EGM96).**

Estatística	Niv. Geométrico X GPS e modelo geoidal 1992	Niv. Geométrico X GPS e EGM96
Média	1,234 m	0,16 m
Desvio Padrão	3,06 m	3,53 m
Mínimo	-7,96 m	-2,23 m
Máximo	3,06 m	3,53 m

Através dos estudos comparativos realizados nesta seção conclui-se que:

- (a) Escolha do modelo EGM96, para ser utilizado no ajustamento desenvolvido neste trabalho deve proporcionar melhores resultados;
- (b) O EGM-96 possui em média um comportamento melhor que modelo geoidal adotado no Brasil.

### **3.5 MÉTODO DE HELMERT BLOCKING E ESTRATÉGIA DE DIVISÃO DOS BLOCOS DE AJUSTAMENTO**

O método de Helmert Blocking foi um método desenvolvido por Helmert no século passado [HELMERT, 1880], no qual, através do algoritmo de Cholesky (usado na resolução de sistemas de equações normais), é possível reduzir uma solução a um número de tarefas independentes, combinando somente as incógnitas que são comuns. Na verdade, este método só veio a ser colocado em prática quando os computadores alcançaram uma autonomia no processamento de uma grande massa de dados. A descrição dada por Helmert sobre este método foi [NOAA, 1989]:

- (1) Estabelecer equações normais para cada bloco tratado separadamente;
- (2) Eliminar as incógnitas para todas as estações internas aos blocos, ou seja, aquelas estações que não tem conexão (através de uma observação) com os blocos



vizinhos. As equações normais reduzidas obtidas nesta etapa, contém somente as incógnitas de junção, as quais são comuns a dois blocos vizinhos;

- (3) Adicionar todas equações reduzidas, termo por termo, de modo que o sistema principal seja estabelecido;
- (4) Resolver o sistema principal para todas incógnitas de junção. Posteriormente, são obtidas as incógnitas pertencentes as estações internas nos blocos, através da retrosolução, desenvolvida dentro dos blocos.

A descrição matemática para o método é a seguinte:

- (1) Considere em cada bloco a divisão de um conjunto de correções incógnitas em dois grupos. Onde  $x$  indica as estações internas no bloco, enquanto  $y$  são as estações de junção (estações comuns a blocos vizinhos).

$$X = \begin{bmatrix} X_x \\ X_y \end{bmatrix} \quad (66)$$

O que leva da mesma forma a divisão dos coeficientes das equações de observação;

$$\begin{bmatrix} A_x & A_y \end{bmatrix} \begin{bmatrix} P_x & P_{xy} \\ P_{yx} & P_y \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_x \\ X_y \end{bmatrix} = L + V \quad (67)$$

Deste modo, as equações normais podem ser escritas;

$$\begin{bmatrix} N_x & N_{xy} \\ N_{yx} & N_y \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_x \\ X_y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} U_x \\ U_y \end{bmatrix} \quad (68)$$

Onde:

$$\begin{aligned} N_x &= A_x^T P_x A_x \\ N_{xy} &= A_{xy}^T P_{xy} A_{xy} \\ N_y &= A_y^T P_y A_y \\ U_x &= A_x^T P_x L_x \\ U_y &= A_y^T P_y L_y \end{aligned} \quad (69)$$

- (2) Então as equações normais reduzidas para as estações de junção  $y$  são formadas pela eliminação das estações internas  $x$ :

$$(N_y - N_{yx} N_x^{-1} N_{yx}^T) X_y = (U_y - N_{yx} N_x^{-1} U_x) \quad (70)$$

$$\bar{N}_y = N_y - N_{yx} N_x^{-1} N_{yx}^T \quad (71)$$

$$\bar{U}_y = U_y - N_{yx} N_x^{-1} U_x \quad (72)$$

$$\bar{N}_y X_y = \bar{U}_y \quad (73)$$

Nesta etapa é possível se obter uma solução completa antes que seja considerado outro bloco. Este procedimento é repetido sucessivamente nos  $i$  blocos que compõem cada nível, iniciando no nível mais baixo (*sibling*). Na obtenção das equações normais parciais dos blocos de um determinado nível, é realizada a sua junção em um nível superior, finalizando no mais alto nível (*parent*) onde é formado o sistema principal de equações normais formado somente pelas estações de junção.

$$\sum_i (\bar{N}_y)_i X_y = \sum_i (\bar{U}_y)_i \quad (74)$$

- (3) Finalmente quando as coordenadas das estações de junção são obtidas segundo a equação (74). A retrosolução é realizada através da equação (68) produzindo a solução para as incógnitas internas a cada bloco.

Todo o processo descrito anteriormente envolve adição e multiplicação de matrizes. As equações normais pertencentes à redes geodésicas contém uma grande quantidade de elementos nulos, os quais poderiam ser eliminados através de um reordenamento dos elementos da matriz na diagonal principal, eliminando assim os elementos nulos. O algoritmo escolhido para desempenhar esta tarefa foi o de *Bankers* [BEATTIE, 1987].

No sistema GHOST, o procedimento de divisão de blocos é desenvolvido por um programa utilitário denominado BLOCK, o qual, em função das coordenadas dos vértices de um polígono faz a divisão de um bloco de um nível superior em dois, no nível inferior. Este programa também faz a identificação das estações de ligação entre blocos (estações de junção), através das quais a integridade das ligações entre os blocos é garantida. Neste caso é feita a opção para a solução parcial das equações normais, ou seja, as estações de junção têm

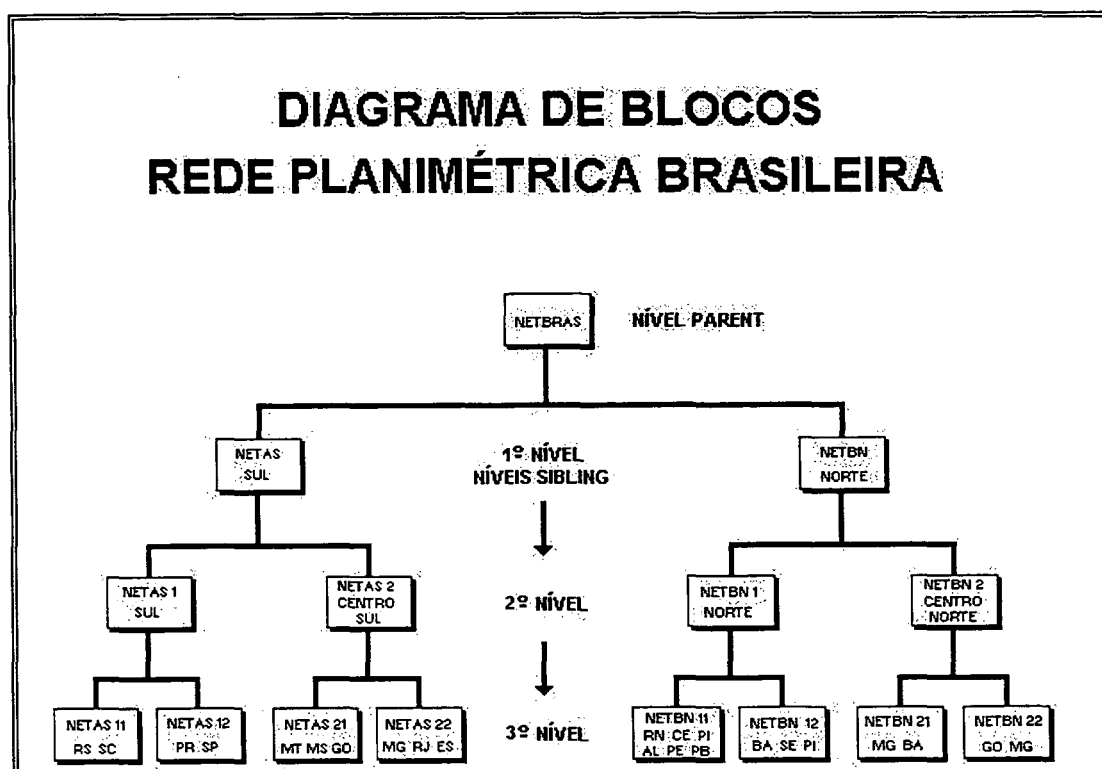
suas incógnitas resolvidas *a priori* em um nível superior para posterior solução das incógnitas internas de cada bloco em um nível inferior [IBGE,1996 ].

No contexto de um esquema de Helmert Blocking, existem várias escolhas a serem feitas, tais como:

- (1) Como a divisão de blocos deve ser feita?
- (2) Qual o tamanho dos blocos?
- (3) Como os blocos devem ser combinados?

A definição da estratégia para a divisão em blocos foi baseada na escolha de um menor número possível de estações de junção, objetivando assim, minimizar o esforço computacional no ajustamento. Para tanto, foram feitos estudos para escolha dos vértices dos polígonos que separam os blocos. Na FIGURA 12 é apresentado um esquema que permite visualização do relacionamento entre os blocos do ajustamento, configuração esta equivalente a dos diretórios do computador.

FIGURA 12 - DIAGRAMA DE DIVISÃO DA REDE EM BLOCOS.



fonte: IBGE, 1996

### 3.6 RESULTADOS

Nesta seção são apresentados os resultados sobre as avaliações estatísticas realizadas no ajustamento. Com este propósito, inicialmente, são fornecidos os quantitativos do ajustamento, incógnitas (coordenadas e parâmetros auxiliares), injeções do ajustamento e finalmente as estatísticas dos resultados obtidos.

#### 3.6.1 Observações utilizadas no ajustamento

N.º de Direções	:	16913
N.º de Distâncias	:	1534
N.º de Azimutes	:	389
N.º de Equações de Posição	:	179
N.º de Equações de Diferença de Posição	:	1777
N.º de Equações Normais Reduzidas Parciais	:	12

As tabelas 11 e 12 apresentam os quantitativos por bloco de ajuste. Na TABELA 11 são apresentados os quantitativos referentes às observações enquanto na TABELA 12 são apresentados os quantitativos referentes aos resultados.

TABELA 11 - QUANTITATIVO DAS OBSERVAÇÕES POR BLOCO.

Blocos	Direções	Distâncias	Azimutes	Eq. Pos. (obs.Doppler)	Eq. Dif. Pos (obs. GPS)
NETAS11	1922	136	57	12	57
NETAS12	2852	179	66	20	805
NETAS21	1777	195	74	27	89
NETAS22	2059	29	32	15	127
NETBN11	2835	826	60	50	468
NETBN12	1641	63	29	14	50
NETBN21	1698	33	27	14	10
NETBN22	2129	73	44	27	171
TOTAL	16913	1534	389	179	1777

TABELA 12 - QUANTITATIVOS DOS RESULTADOS DO AJUSTAMENTO.

\*nº de par. aux. junção - número de parâmetros auxiliares de junção.

\*\* nº de eq.n.red.par. - número de equações normais reduzidas parcialmente.

Blocos	Nº de Estações	Nº de Incógnitas	Nº de Est.de Junção	Nº de par. aux. junção*	Nº de eq. n.red.par.**
NETAS11	531	1085	21	11	60
NETAS12	907	2022	107	11	255
NETAS21	603	1272	48	12	121
NETAS22	597	1327	107	11	243
NETBN11	1474	3232	81	13	198
NETBN12	509	1083	63	12	145
NETBN21	411	845	45	12	106
NETBN22	650	1424	79	12	194

### 3.6.2 Incógnitas do ajustamento

Além das coordenadas ajustadas de cada estação, foram também estimados como incógnitas os parâmetros auxiliares. O emprego de parâmetros auxiliares em um ajustamento combinado<sup>4</sup>, tem como objetivo, permitir que a orientação e a escala oriundas das observações GPS prevaleçam aos parâmetros da rede clássica. Portanto, em um ajustamento combinado no qual têm-se vários tipos de observações originadas de diferentes sistemas (Doppler e GPS), são determinados como incógnitas, além das correções aplicadas aos valores das coordenadas iniciais, os parâmetros auxiliares. Um exemplo simples de parâmetro auxiliar, é o fator de escala atribuído a um conjunto de distâncias que possuem o mesmo erro de escala. Outro exemplo é o parâmetro de orientação que tem como função, determinar o erro de orientação de um conjunto de azimutes astronômicos [NOAA, 1989].

Como pode ser visto na FIGURA 13, a rede geodésica brasileira foi dividida em 8 blocos, com o objetivo de possibilitar o ajuste simultâneo. As incógnitas do ajustamento são as coordenadas das 5396 estações mais 15 parâmetros auxiliares, sendo eles:

- 1 orientação para os azimutes em FK5;

<sup>4</sup> No sentido que, ajustam-se observações terrestres e espaciais.

- 7 parâmetros de escala para as distâncias da rede clássica;
- 7 parâmetros de transformação entre o WGS84 e o ITRF94.

Na TABELA 13 são apresentados os parâmetros de translação e escala entre WGS-84 e ITRFyy, sendo de expressão significativa, enquanto os parâmetros de rotação devido a sua pequena dimensão poderiam ser desprezados.

TABELA 13 - PARÂMETROS AUXILIARES ESTIMADOS NO AJUSTAMENTO GLOBAL.

Parâmetro	Valor	Desvio Padrão
FK5	2,2929"	0,16 "
TRAXWGS84	-2,3629 m	0,18 m
TRAYWGS84	0,6458 m	0,19 m
TRAZWGS84	0,0556 m	0,11 m
ROTXWGS84	-0,0015"	0,01"
ROTYWGS84	-0,0017"	0,01"
ROTZWGS84	-0,0061"	0,01"
WGS84SCPR	-0,0902 ppm	0,01 ppm
G66scale	-3,3023 ppm	0,16 ppm
BASscale	-1,4358 ppm	0,83 ppm
Posudes	8,9358 ppm	0,38 ppm
Pogouest	6,0735 ppm	0,73 ppm
Ponordes	8,3132 ppm	0,72 ppm
Ponorte	5,2051 ppm	0,72 ppm
Ponort	9,8976 ppm	0,78 ppm

### 3.6.3 Injunções do Ajustamento

As 11 estações SIRGAS foram injuncionadas às suas respectivas coordenadas com os desvios padrão divididos pelo fator 10, ou seja fornecendo um peso superior às coordenadas SIRGAS. A aplicação deste fator 10 deve-se ao fato de que a maioria dos resultados obtidos através do processamento GPS são muito otimistas, gerando assim, desvios para as coordenadas inferior ao milímetro. Isso acarreta um peso nas coordenadas das campanhas GPS superior que as estações SIRGAS, conduzindo assim à sensíveis alterações nas coordenadas das estações SIRGAS, o que seria indesejável.

A convergência foi alcançada no ajustamento após a terceira iteração, obtendo-se como fator de variância *a posteriori* o valor de 1,511.

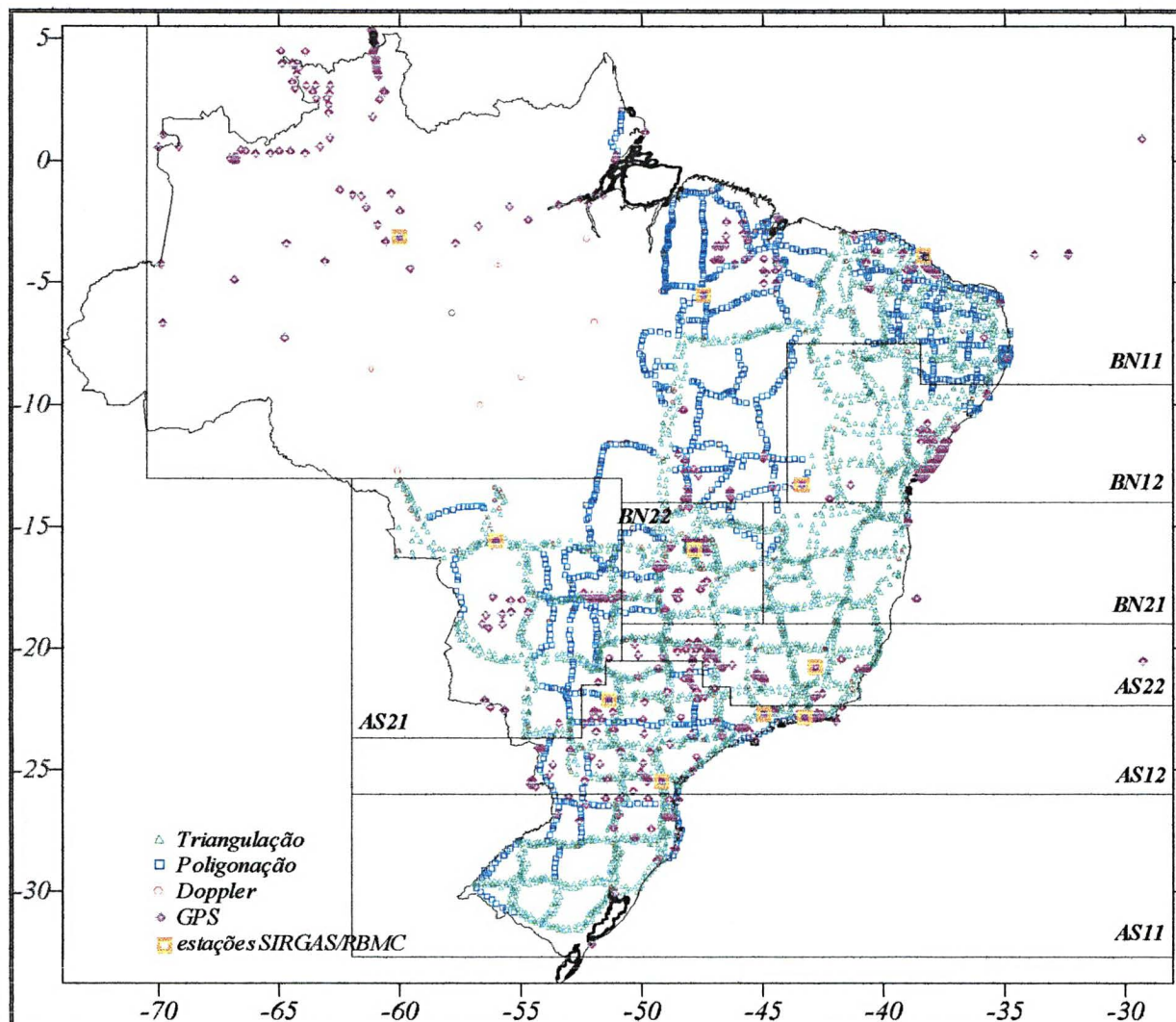


FIGURA 13 - REDE GEODÉSICA BRASILEIRA E A DIVISÃO EM BLOCOS

#### 3.6.4 Análise estatística dos resultados do ajustamento

Foram utilizados dois critérios para a análise da estimativa de precisão das coordenadas elipsoidais. O primeiro critério é baseado na precisão das coordenadas com relação ao sistema de referência (denominado neste trabalho de absoluta), a entidade adotada para esta análise é o desvio padrão das coordenadas. Os gráficos 1 e 2 representam a precisão absoluta das três componentes (latitude, longitude e altitude) nas redes GPS e total (clássica e GPS),

respectivamente. Para todos os testes estatísticos foi aplicado o nível de confiança de 95%. No GRÁFICO 1 observa-se que, cerca de 50% das coordenadas (latitude, longitude e altitude) da rede GPS encontram-se com erro absoluto de 1 a 10 cm. O GRÁFICO 2 apresenta resultados esperados na rede clássica, analisando-se neste caso, apenas as componentes horizontais (latitude e longitude), verificando-se que, cerca de 70% dos erros absolutos encontram-se entre 20 a 50 cm.

**GRÁFICO 1 - DISTRIBUIÇÃO ESTATÍSTICA DOS DESVIOS PADRÃO  
DAS COORDENADAS DA REDE NACIONAL GPS.**

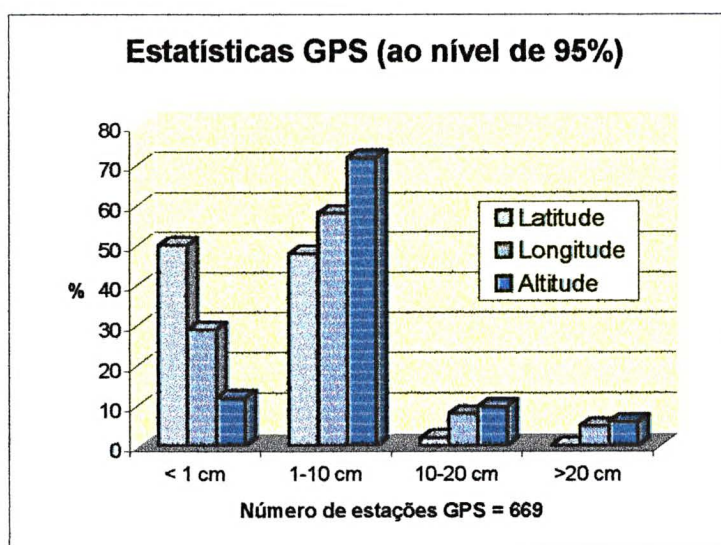
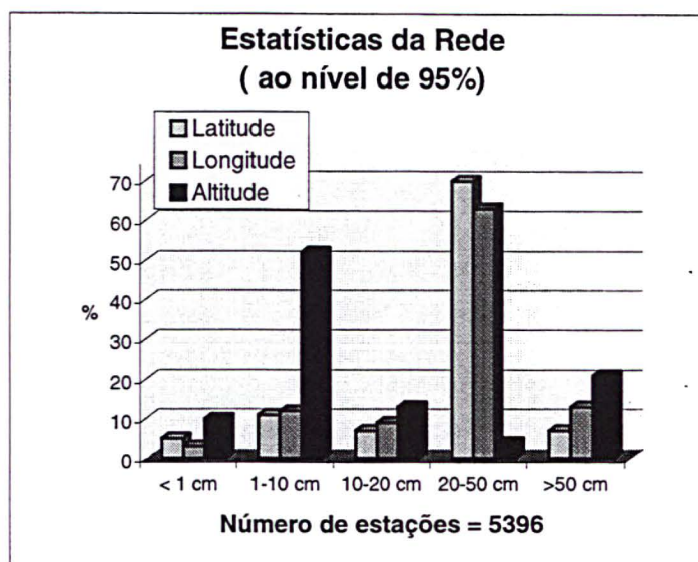


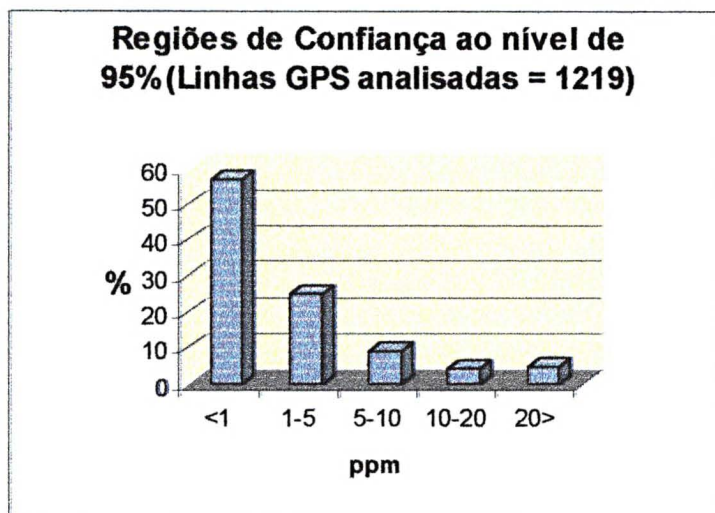


GRÁFICO 2 - DISTRIBUIÇÃO ESTATÍSTICA DOS DESVIOS PADRÃO DAS COORDENADAS DE TODA A REDE.

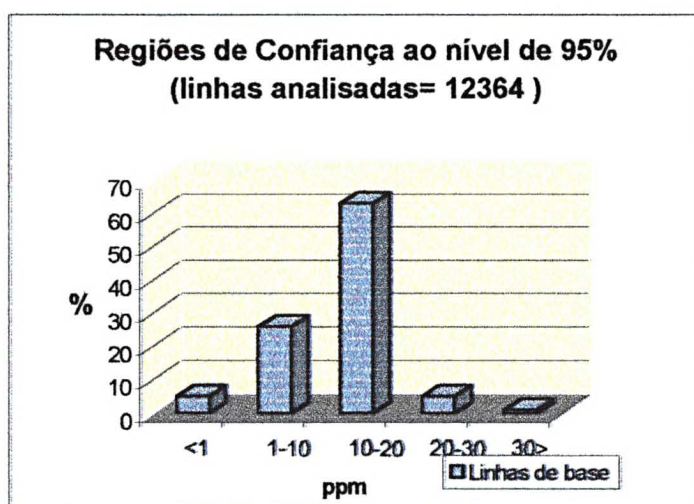


O segundo critério utilizado na análise da rede está vinculado a média da precisão das coordenadas de uma estação com relação a outra (denominada neste trabalho de precisão relativa). Entretanto, existem vários critérios para este tipo de análise, tais como: linhas observadas, linhas dentro de um região de tamanho específico, todas as combinações possíveis entre estações e etc. Neste trabalho só foram analisadas as linhas efetivamente observadas (ao nível de confiança de 95%), por fornecer uma solução mais simples em termos computacionais e pelo seu significado direto com as observações efetivamente realizadas. A entidade utilizada para esta avaliação é a elipse relativa de erros, representada através do erro relativo obtido nas linhas de base, expresso em *partes por milhão* (ppm). No GRÁFICO 3 verifica-se que, avaliando 1219 linhas de base GPS (sem considerar as repetições de linhas incluídas no total de 1777), cerca de 60 % encontram-se com erros relativos entre 0 a 1 ppm, enquanto no GRÁFICO 4, para 12364 linhas de base observadas em toda a rede geodésica encontram-se 60% dos erros relativos entre 10 a 20 ppm, fato este esperado para uma rede clássica.

**GRÁFICO 3 - DISTRIBUIÇÃO ESTATÍSTICA DA PRECISÃO DAS LINHAS DE BASE GPS AJUSTADAS**



**GRÁFICO 4 - DISTRIBUIÇÃO ESTATÍSTICA DA PRECISÃO DAS LINHAS DE BASE OBSERVADAS EM TODA A REDE GEODÉSICA.**



### 3.6.5 Estudo Adicional

Foi realizado um estudo adicional com o objetivo de verificar a variação das linhas de base GPS no contexto temporal. Com este propósito foram selecionadas projetos GPS que

possuem longas linhas de base (acima de 1000 km). Estas linhas tiveram os seus valores atualizados para a época SIRGAS, 1995,4. O programa utilizado nesta redução foi o TRNOBS o qual trabalha com o modelo NNR-NUVEL-1A. Foram selecionadas 16 linhas de base GPS, observadas em diferentes épocas e de extensão variando de 800 a 1300 km. Como resultado das discrepâncias entre as linhas de base processadas e as reduzidas para a época SIRGAS foram em todos os casos inferiores a 1 mm, o que vem a comprovar que esta redução não necessita ser efetuada em todas campanhas GPS.

Baseado no conteúdo deste capítulo o qual aborda variados aspectos sobre o ajustamento da rede geodésica do brasileira ao SIRGAS, podem ser citadas como principais contribuições:

- (a) Apresentação das equações de observação e a sua utilização em um ajustamento pelo método paramétrico;
- (b) Informações sobre as observações (tipos e ponderações) participantes;
- (c) Avaliações sobre a adoção de um modelo do geopotencial;
- (d) Incógnitas e Injunções;
- (e) Avaliação estatística dos resultados.

Ainda como parte conclusiva deste capítulo, pode-se dizer que, o ajustamento em um referencial geocêntrico, tal como o SIRGAS, não vem a melhorar a precisão das coordenadas das estações, mas traz algumas vantagens, sendo elas:

- (a) Fornecer um tratamento refinado através das inclusão de todas observações disponíveis em ajustamento simultâneo;
- (b) Compatibilidade das coordenadas com os sistemas de posicionamento por satélites artificiais, como por exemplo GPS;
- (c) Fornecer coordenadas compatíveis globalmente, facilitando o intercâmbio de informações georeferenciadas.

## **CAPÍTULO 4 - PROCEDIMENTO DE TRANSFORMAÇÃO DE COORDENADAS ENTRE OS SISTEMAS SAD69 E SIRGAS**

Mantendo a proposta deste trabalho na adoção de métodos e procedimentos de integração do SIRGAS aos sistemas de referência terrestres à nível nacional e internacional, este capítulo se destina a aplicação de um procedimento de integração entre SAD69 – materialização 1996 (SAD69 – 1996) e SIRGAS. Conforme apresentado na seção 2.4, o processo de transformação de coordenadas entre sistemas de referência terrestres é considerado um dos métodos de integração. Com este objetivo serão estimados parâmetros de transformação entre os dois sistemas em questão. As diferenças em coordenadas ainda existentes após a transformação, serão modeladas mediante uma função de superfície apropriada. Alguns trabalhos [OLIVEIRA, 1998] e [COSTA, 1999] sobre este tema já foram desenvolvidos no Brasil, sedo que em cada um deles adota-se uma modelagem polinomial diferente. Neste trabalho, visando melhor entendimento do leitor, são relatados inicialmente aspectos sobre a definição, materialização e densificação do SAD69. Na sequência do capítulo é abordada a metodologia e os resultados obtidos referente à solução técnica adotada.

### **4.1 DEFINIÇÃO DO SAD69**

O SAD69 é um sistema geodésico regional de concepção clássica [CASTAÑEDA, 1986]. A sua utilização pelos países sul-americanos foi recomendada em 1969 através da aprovação do relatório final do Grupo de Trabalho sobre o Datum Sul Americano, pelo Comitê de Geodésia reunido na XI Reunião Pan-americana de Consulta sobre Cartografia. Apenas em 1977 ele foi oficialmente adotado como sistema de referência para trabalhos geodésicos e cartográficos desenvolvidos em território brasileiro.

O Projeto do Datum Sul Americano foi dividido em duas partes [FISCHER, 1973]:

- (1) Estabelecimento de um sistema geodésico tal que o respectivo elipsóide apresentasse “boa adaptação” regional ao geóide.

- (2) Ajustamento de uma rede planimétrica de âmbito continental referenciada ao sistema definido.

O procedimento clássico de definição da orientação espacial de um elipsóide de referência corresponde à técnica de posicionamento astronômico, na qual arbitra-se que a normal ao elipsóide e a vertical no ponto origem sejam coincidentes, assim como, a ondulação geoidal neste ponto é zero. Induzindo assim com que as coordenadas geodésicas ( $\phi_0$ ,  $\lambda_0$  e  $h_0$ ) e astronômicas ( $\Phi_0$ ,  $\Lambda_0$  e  $H_0$ ) sejam idênticas. O mesmo pode ser dito para os azimutes geodésico ( $\alpha_0$ ) astronômico ( $A_0$ ). Nestas condições caracteriza-se a situação espacial do referencial definido da seguinte forma:

$$\phi_0 = \Phi_0 ; \quad \lambda_0 = \Lambda_0 ; \quad h_0 = H_0$$

Sendo o paralelismo entre o CG e CTS assegurado por  $\alpha_0 = A_0$ .

Com o propósito de ser um ensaio ou referência para a definição do SAD69, o sistema Astro-Datum Chuá com ponto origem em Chuá e elipsóide de referência Internacional 1924, foi estabelecido segundo a técnica de posicionamento astronômico. Conforme foi colocado em publicação do IPGH [FISCHER, 1973], ele desenvolveria o papel de um sistema “provisório” a ser utilizado unicamente na uniformização dos dados disponíveis na época (pois o IBGE tinha recém concluído um ajustamento da rede planimétrica no Astro-Datum Chuá). Isso não representaria ainda o sistema “ótimo” para a América do Sul, faltando ainda a boa adaptação geóide-elipsóide, para que as observações geodésicas pudessem ser reduzidas à superfície do elipsóide. Sendo assim, na condição de um sistema provisório, no cálculo e ajustamento das coordenadas em Astro-Datum Chuá as componentes do desvio da vertical e ondulação geoidal foram arbitradas em zero, assumindo a coincidência entre geóide e elipsóide.

Segundo CADESS et al. [1991], o fato de se desprezar as informações que relacionam tais superfícies (geóide e elipsóide) pode acarretar distorções no desenvolvimento do cálculo

da rede, tornando-se crítico em redes geodésicas de grandes extensões. Diante de tal situação, sugere-se que o ponto origem do sistema seja localizado no centro geométrico da área de interesse, de preferência em uma área de configuração topográfica suave, requisitos satisfeitos pela adoção do ponto origem Chuá. Na época também foram realizadas conexões entre as redes planimétricas dos países vizinhos e novas observações astronômicas foram realizadas, possibilitando a determinação astro-geodésica das deflexões da vertical e desníveis geoidais relativamente ao Astro-Datum Chuá, o que veio a representar uma melhoria na adaptação geóide-elipsóide. A triangulação foi a metodologia observacional predominante no estabelecimento das novas cadeias. Uma rede de trileração HIRAN fez a ligação entre as redes geodésicas da Venezuela e Brasil. Outra informação a ser alterada era o elipsóide de referência. Na época, a IUGG (União de Geodésia e Geofísica Internacional) recomendou a utilização do GRS67 (Sistema Geodésico de Referência 1967), cujos parâmetros são  $a = 6378160,0$  e  $f = 1/298,247$  (nos cálculos este parâmetro foi arredondado para 298,25), conduzindo assim, a adoção desta figura no projeto SAD69, em troca do Internacional 1924. Escolhido o elipsóide de referência, tornou-se necessário fixar três parâmetros para o seu posicionamento espacial. No caso do SAD69 este posicionamento deu-se em termos dos seguintes parâmetros topocêntricos no ponto origem Chuá [CASTAÑEDA, 1986]:

$$\xi = +0,31''; \quad \eta = -3,52''; \quad \Delta N = 0 \text{ m}$$

Os métodos para o estabelecimento dos parâmetros  $\xi$ ,  $\eta$ ,  $\Delta N$  são absolutamente irrelevantes, importando apenas que os valores adotados sejam mantidos invariantes [CASTAÑEDA, 1986] [VANICEK & KRAKIWSKY, 1996].

O SAD69 é um exemplo típico de sistema estabelecido segundo o método clássico, implementado antes das técnicas espaciais de posicionamento e baseado em um modelo da Terra de melhor adaptação do respectivo elipsóide ao geóide na América do Sul, recebendo a denominação de sistema geodésico regional ou local, o que caracteriza um deslocamento de dezenas de metros do centro do seu elipsóide com relação ao centro de massa da Terra. Sua orientação espacial foi fornecida pelo azimuth geodésico da direção inicial Chuá-Uberaba, segundo o resultado do ajustamento SAD69 (original), obtido mediante a técnica de relaxação

de azimute de partida. Seus valores astronômico ( $A_0$ ) e geodésico ( $\alpha_0$ ), são respectivamente [FISHER, 1973]:

$$A_0 = 271\ 30' 05,42''$$

$$\alpha_0 = 271\ 30' 04,05''$$

Sendo assim, os valores das componentes do desvio da vertical acima citados não verificam a condição de Laplace na sua forma simplificada ( $\alpha = A - \eta \tan \phi$ ), diferindo de  $\alpha_0$  em  $0,11''$ , discrepância explicável pelo fato de  $\alpha_0$  ser uma grandeza ajustada. Este valor foi mantido invariante sendo o parâmetro definidor da orientação do SAD69, assegurando de certa forma o paralelismo entre o sistema CG associado ao SAD69 e o CTS [CASTAÑEDA, 1986]. Informações mais detalhadas sobre a definição do SAD69 podem ser vistas em [CASTAÑEDA, 1986] e [FISHER, 1973].

## 4.2 PROCEDIMENTOS DE DENSIFICAÇÃO DO SAD69

A rede planimétrica continental do SAD69 foi ajustada pela primeira vez na década de 60. Neste ajustamento (comentado na seção anterior), as cadeias de triangulação de vários países tiveram seus dados criticados, recebendo o mesmo tratamento e avaliação. Em função da extensão da rede e das limitações computacionais da época, fez-se necessário a divisão do ajustamento em áreas. Optou-se, então, pelo método de ajustamento conhecido por “piece-meal” [CADESS et al., 1991], no qual uma vez ajustada uma determinada área, as estações das áreas adjacentes, comuns à ajustada, são mantidas fixas, de modo que cada estação da rede só tenha um par de coordenadas correspondente. Este procedimento foi mantido pelo IBGE no processo de densificação da rede planimétrica após a conclusão do ajustamento em SAD69. Esta metodologia de densificação foi uma das causas do acúmulo significativo de distorções geométricas (escala e orientação) na rede planimétrica. Outro fato crítico para o acúmulo de distorções foi o negligenciamento das reduções das observações geodésicas ao elipsóide. Em alguns trechos da rede estas reduções foram aplicadas através de dados obtidos por mapas geoidais pouco precisos. Outro fato que não pode ser ignorado é a diversidade de instrumentos e métodos utilizados no decorrer do estabelecimento da rede, tornando

complicada a análise da precisão das coordenadas das estações. Os erros acumulados às coordenadas em SAD69 foram grandes suficientes para que fosse buscada uma outra alternativa mediante as necessidades atuais. Em um país de características continentais como é o Brasil, estas distorções chegaram a atingir 15 metros nos extremos da rede, segundo resultados obtidos no ajustamento simultâneo realizado em 1996, a ser descrito na seção 4.4.

CADDESS et al. [1991], apontam problemas semelhantes aos relatados anteriormente como colaboradores na propagação de distorções na rede, sendo eles: as fraquezas geométricas da rede, a ausência de um modelo geoidal preciso e a aplicação de métodos não recomendáveis na integração dos novos levantamentos. Eles sugerem também a utilização de uma rede nacional GPS como controle e um ajustamento posterior combinando as observações da rede clássica e as GPS.

Muitas mudanças ocorreram na planimetria na última década. A começar pela utilização da técnica de posicionamento através do sistema de satélites NAVSTAR/GPS, alterando sua concepção 'planimétrica', pois são estabelecidas simultaneamente as três componentes definidoras de um ponto no espaço. Esta alteração nos levantamentos de campo foi propagada ao cálculo das respectivas observações, surgindo a necessidade de se desenvolver ajustamentos de redes tridimensionais.

### **4.3 AS REALIZAÇÕES DO SAD69**

O estabelecimento e manutenção do Sistema Geodésico Brasileiro (SGB) é missão institucional do IBGE na área de Geodésia. Neste sentido, todos os esforços têm sido feitos com o propósito de fornecer aos usuários produtos de melhor qualidade, apesar das limitações. Para tanto, faz-se uso dos melhores programas computacionais disponíveis no meio científico, aliados à aplicação de equipamentos de última geração e modernas técnicas de levantamentos.

Desde que o IBGE iniciou a implantação do SGB, na década de 40, até os dias de hoje, ocorreram muitas transformações na rotina de trabalho. Fazem parte desta evolução, o instrumental utilizado no estabelecimento das estruturas (redes), as técnicas de observação e a



aplicação de novas metodologias no tratamento e ajustamento das observações. Vários exemplos podem ser dados no contexto da evolução pela qual passou o SGB. A começar pela troca dos teodolitos e distanciômetros eletrônicos pelos rastreadores GPS no início desta década, os cálculos e ajustamento que eram realizados até a década de 70 por calculadoras e passaram a ser efetuados em programas científicos, os quais fornecem uma quantidade de informações que até então não se tinha acesso.

Por esta evolução também passaram os referenciais das coordenadas. Um sistema de referência geodésico definido é representado por uma superfície matemática, com forma, dimensões e orientação, sobre a qual todas informações espaciais são referidas. No Brasil o datum Córrego Alegre foi utilizado como referencial oficial brasileiro da década de 50 até a década de 70, quando foi adotado oficialmente o SAD69. Este último é um referencial regional, ou não-geocêntrico, pois é baseado em um modelo da Terra (elipsóide) o qual se adapta melhor na América do Sul. O seu ponto origem é a estação Chuá, cujas coordenadas foram determinadas astronômica. As estações geodésicas que materializam originalmente o SAD69 foram estabelecidas através de métodos clássicos de levantamentos geodésicos, tais como triangulação, trilateração e poligonação.

Mais de 20 anos se passaram, e os novos levantamentos geodésicos – baseados em novas técnicas observacionais, tais como o GPS – foram sendo incorporados à rede existente sem que uma análise detalhada dos resultados fosse feita. Sabe-se portanto, que esta técnica (GPS) fornece resultados de precisão superior ao dos procedimentos clássicos; conseqüentemente, as estruturas geodésicas estabelecidas por GPS é que deveriam controlar as redes clássicas. Um equívoco era cometido ao integrar levantamentos GPS em uma estrutura de precisão inferior, sobre a qual se desconhece a precisão interna, pois até aquele momento não se dispunha de ferramentas para análise dos erros inerentes às técnicas aplicadas na densificação da rede.

Tendo em vista todos os problemas encontrados na densificação do SAD69, constatou-se a necessidade de um reajustamento da rede planimétrica, desta vez de forma simultânea e abrangendo todas observações disponíveis até o momento. Atualmente, dispõe-se de software e máquinas capazes de realizar um ajustamento global e simultâneo da rede sendo possível

dar um tratamento homogêneo às observações, conhecendo-se com mais confiabilidade as coordenadas das estações através dos seus respectivos erros absolutos, representados pelos desvios padrão. Na TABELA 14 são apresentados valores médios dos erros das coordenadas (segundo a estrutura que pertence), obtidos após o reajustamento. Hoje em dia, todos os usuários que solicitam coordenadas ao BDG do IBGE recebem, além das coordenadas das estações, os seus respectivos erros absolutos.

TABELA 14 - VALORES MÉDIOS DOS DESVIOS PADRÃO DAS COORDENADAS APÓS O REAJUSTAMENTO - 1996.

Precisão	Estações GPS	Estações da rede clássica
Planimétrica (horizontal)	10 cm	50 cm
Altimétrica (vertical)	10 a 30 cm	-

Apesar do uso do GPS ter aumentado consideravelmente a nível regional e global, as observações referentes à rede clássica também participaram do reajustamento, formando uma estrutura de 4759 estações, contra 1285 ajustadas quando da definição do SAD69. Este reajustamento combinou duas estruturas estabelecidas independentemente por diferentes técnicas, o GPS e os métodos clássicos. A ligação entre elas é feita através de 49 estações da rede clássica observadas por GPS, isto é, a rede GPS por ser uma estrutura de precisão superior) tem por função controlar a rede clássica. Algumas observações DOPPLER também foram incluídas no ajustamento com este objetivo.

Como o SAD69 é o referencial oficialmente adotado no Brasil, neste reajustamento foram mantidos os mesmos parâmetros definidores e injunções iniciais do primeiro ajustamento em SAD69.

A partir de 1997, os usuários do Banco de Dados Geodésicos (BDG) do IBGE passaram a receber coordenadas das estações planimétricas resultantes do ajustamento global concluído em meados de 1996. Os parâmetros definidores do SAD69 foram mantidos no reajustamento, sendo alterado somente a metodologia de ajustamento e a inclusão de novas observações, não caracterizando desta forma uma mudança do referencial definido, apenas do materializado ( SAD69 - materialização 1996).

#### 4.4 METODOLOGIA

O estabelecimento de um sistema de referência terrestre – SRT pode ser dividida em duas partes: a teórica ou abstrata e a prática ou física. A parte teórica está relacionada aos elementos definidores do sistema, alguns deles podendo ser estabelecidos empiricamente. Deste modo através de uma figura matemática – o elipsóide de referência e seus parâmetros de fixação e orientação no espaço é definido um SRT. Na prática, um SRT é caracterizado por um conjunto de estações geodésicas, configuradas na forma de rede e estabelecidas por técnicas de posicionamento e cujas coordenadas são calculadas segundo modelos matemáticos aplicados através de um ajustamento às observações. Em alguns casos, na prática é comum adotar para ambos, definição e materialização do sistema, uma única denominação, como é o caso do SAD69. Assim sendo, o ajustamento de uma rede geodésica pode ser realizado em uma mesma definição, com diferentes injunções ou a mesma rede poderá ser ajustada com respeito a várias definições [JUNKINS, 1996].

As implicações do SGB como parte integrante do SIRGAS são: a introdução de um novo referencial definido e o reajustamento das observações geodésicas. Este processo acarreta a mudança das coordenadas das estações da rede geodésica, como um resultado combinado de dois efeitos [COLLIER et al., 1998] :

- (1) O impacto da mudança do referencial definido. Este é um efeito que não altera a forma da rede e pode ser estimado através dos parâmetros da transformação de similaridade.
- (2) O impacto da inclusão de observações e metodologia de ajustamento nova, altera a geometria (forma) da rede. Esta mudança na forma é denominada “distorção da rede” e não pode ser estimada através de uma transformação de similaridade.

Existe também um outro conceito relacionado à distorção de rede, no sentido de que as observações geodésicas estão eivadas de erros sistemáticos e acidentais. Enfatiza-se que estas distorções representam deslocamentos horizontais em um referencial de concepção clássica, e deve ser entendido que não afetem a terceira dimensão, a altitude [VANICEK & STEEVES, 1996].

A estimativa de distorções, segundo a mudança na forma da rede, requer a análise das diferenças entre as coordenadas de suas estruturas antiga e nova, materialização 1996 (SAD69) e materialização 1998 (SIRGAS). Com o objetivo de se fazer uma análise preliminar sobre as duas realizações, são apresentados na TABELA 15 as diferenças em coordenadas (máximas e médias), conforme a divisão de blocos no ajustamento. Os valores das diferenças são obtidos a partir da diferença de coordenadas entre duas materializações 1996 e 1998. Na TABELA 15 observa-se que a diferença máxima encontrada na rede é da ordem de 2,65 metros, e a uma média de 0,58 m.

TABELA 15 - DIFERENÇAS EM COORDENADAS, SEGUNDO CADA BLOCO DE AJUSTAMENTO DA REDE.

BLOCOS DE AJUSTE	n° de estações comuns	diferença média (m)	diferença máxima (m)	ESTAÇÃO COM VALOR MAXIMO
NETAS11	530	1,405	1,725	11081
NETAS12	823	0,503	1,296	11009
NETAS21	596	0,760	1,885	90176
NETAS22	502	0,320	0,677	8285
NETBN11	1267	0,711	2,649	10290
NETBN12	474	0,314	1,565	10750
NETBN21	408	0,370	0,663	1878
NETBN22	592	0,234	0,804	92552

Para uma melhor compreensão da metodologia proposta serão adotadas as seguintes denominações para os diferentes conjuntos de coordenadas:

$SAD69_{AJD} - 1996$	Coordenadas ajustadas em SAD-69, na materialização 1996
$SIRGAS_{AJD}$	Coordenadas ajustadas em SIRGAS, na materialização 1998.
$SIRGAS_{TRANS}$	Coordenadas ajustadas em SAD69 na materialização 1996, transformadas para SIRGAS.

Sendo assim, para o relacionamento SAD69 – 1996 e SIRGAS são traçadas as seguintes etapas:

1. Em um primeiro passo são calculados os parâmetros de transformação através do modelo de similaridade ou Helmert (preserva a ortogonalidade nas coordenadas transformadas) utilizando-se as coordenadas de pontos comuns que possuem melhor precisão em ambos sistemas. Com este objetivo, pretende-se estimar parâmetros “quase” isentos de distorções.

As coordenadas dos pontos comuns em  $SAD69_{AJD} - 1996$  e  $SIRGAS_{AJD}$  são resultados de ajustamentos e não de transformação entre sistemas. Nesta etapa será utilizado o programa HELMR1 disponível no software Bernese, versão 4.0. Detalhes sobre a sua utilização serão apresentados no item 4.5.

2. De posse dos parâmetros, as coordenadas de todas as estações que compõem o  $SAD69_{AJD} - 1996$  são transformadas produzindo um conjunto de coordenadas  $SIRGAS_{TRANS}$ . Isso elimina a diferença entre a definição ou “quase” definição entre os dois sistemas (geocêntrico e regional), mas não leva em conta as diferenças existentes entre as materializações.
3. Subtrai-se o conjunto de coordenadas  $SIRGAS_{TRANS}$  de  $SIRGAS_{AJD}$  para determinar as distorções, ou seja, as diferenças entre materializações. Estas distorções serão modeladas através de modelo polinomial, fornecendo assim uma representação contínua entre os dois conjuntos de coordenadas. Para elaboração do modelo de distorções serão utilizadas todas as estações nas diferentes materializações.
4. Finalmente, as distorções modeladas são aplicadas às coordenadas  $SIRGAS_{TRANS}$  através de interpolação.

De um modo geral, os resultados são satisfatórios na aplicação da modelagem de distorções se houver uma boa densidade de estações aliado a um bom comportamento das distorções. Portanto, se a distorção varia de forma randômica, a sua modelagem matemática será complexa e difícil. A alternativa proposta neste trabalho para a modelagem das distorções é aquela disponível no programa ESTPM. O programa ESTPM foi fornecido pelo GSD e alterado para sua utilização com os dados brasileiros. Detalhes sobre esta etapa serão vistos na

## seção 4.6.

Geralmente, as distorções se propagam ao longo da rede. Como por exemplo, a precisão de uma rede geodésica de alta precisão, estabelecida por procedimentos clássicos, deve ser melhor que 20 ppm em posições relativas ao nível de confiança de 95% [IBGE, 1983]. Isso conduz a uma distorção de 20 metros à distância de 1000 km. Igualmente para pontos de precisão, as especificações conduzem a até 50 metros de distorção. Isso significa que razoáveis distorções são possíveis mesmo quando a precisão dos levantamentos esteja dentro das normas. Em alguns casos esta situação pode se configurar de uma forma mais crítica, através de distorções que não são previsíveis em um contexto local (vide FIGURA 14).

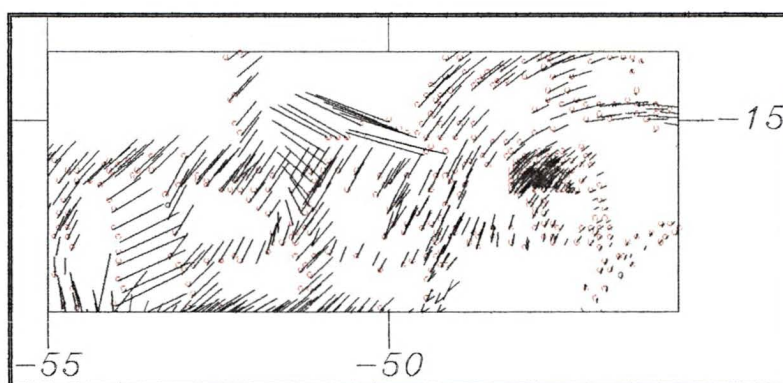


FIGURA 14 - EXEMPLO DE DISTORÇÃO DE TENDÊNCIA LOCAL.

Mais uma vez, deve-se enfatizar que no procedimento desenvolvido, é necessário distinguir a distorção e o efeito de mudança do referencial definido. Em outras palavras, diz-se que o sistema materializado não coincide necessariamente com o definido devido às distorções da rede. A magnitude e direção das distorções, pode ser variável dentro de uma região, como mostra a FIGURA 14. Em contraste, a mudança do referencial definido causa uma alteração sistemática nas coordenadas.

Na prática, um dos objetivos da modelagem das distorções é estabelecer um relacionamento matemático, o mais próximo possível, entre uma nova materialização e informações referenciadas na materialização antiga. Sendo assim, a validade na aplicação da

modelagem das distorções depende acima de tudo desta consideração, além de outras que serão abordadas neste trabalho.

#### **4.5 CÁLCULO DOS PARÂMETROS DE TRANSFORMAÇÃO ENTRE SAD69 (MATERIALIZAÇÃO 1996) E SIRGAS**

O programa HELMR1 [ROTHACHER & MERVART, 1996] foi escolhido para os cálculos dos parâmetros de transformação adotando-se modelo matemático de similaridade ou Helmert apresentado na seção 2.4. Nesta modelagem são apresentados 7 parâmetros incógnitos, representando o relacionamento geométrico entre dois sistemas cartesianos ortogonais. As diferenças de origem de cada sistema são corrigidas através das translações (uma em cada eixo coordenado). As rotações fundamentais ou ângulos de Euler, podem ser consideradas a partir do momento que o paralelismo entre os sistemas não é assegurado na prática. O sétimo e último parâmetro considera as diferenças métricas ou diferenças em escala que ocorrem entre os sistemas geodésicos. Estas diferenças decorrem da aplicação de diferentes técnicas de levantamentos no estabelecimento das coordenadas das estações que vem a materializar o sistema definido.

Como dados de entrada para o programa HELMR1 são necessários dois conjuntos de coordenadas elipsoidais, comuns a cada sistema de referência e a especificação dos respectivos elipsóides. Na estimativa dos parâmetros o modelo matemático é aplicado indiretamente através da constituição de sistemas de equações. Portanto torna-se necessária a atribuição de peso aos valores observados, que no caso são as coordenadas das estações envolvidas no ajustamento. Segundo os resultados constantes neste trabalho, apresentados no capítulo 3, comprova-se que a rede planimétrica brasileira possui grandes variações na precisão das coordenadas de suas estações. Deste modo, a solução encontrada foi estimar parâmetros escolhendo-se somente estações com coordenadas de alta precisão e acurácia, ou seja, trabalhando-se apenas com as estações estabelecidas por GPS com uma quantidade abundante de observações. As seguintes estações foram utilizadas para gerar os conjuntos parâmetros de transformações: Chuá, Curitiba (RBMC), Brasília (RBMC), Manaus (RBMC), 91696 (rede São Paulo), Pres. Prudente (RBMC), Cachoeira Paulista (SIRGAS), Rio de Janeiro (SIRGAS), Fortaleza (RBMC), Viçosa (RBMC) e Bom Jesus da Lapa (RBMC). De

acordo com o procedimento mencionado, foram realizados testes para 3, 4 e 7 parâmetros cujos resultados são fornecidos na TABELA 16.

TABELA 16 - PARÂMETROS DE TRANSFORMAÇÃO SAD69 –1996 E SIRGAS.

SAD69 / SIRGAS	Translação em X (m) / $\sigma$	Translação em Y (m) / $\sigma$	Translação em Z (m) / $\sigma$	Rotação em X(") / $\sigma$	Rotação em Y(") / $\sigma$	Rotação em Z(") / $\sigma$	Escala (ppm) / $\sigma$
3 parâmetros	67,358 / 0,013	-3,974 / 0,013	38,314 / 0,013	-	-	-	-
4 parâmetros	67,185 / 0,041	-3,789 / 0,044	38,386 / 0,020	-	-	-	0,0420 / 0,010
7 parâmetros	67,084/ 0,085	-3,839/ 0,079	38,275/ 0,068	0,0003 / 0,0021	-0,0060 /0,0021	0,0024 / 0,0033	0,0420 / 0,009

A FIGURA 15 apresenta as diferenças horizontais entre os sistemas SAD69 – 1996 e SIRGAS na forma de isolinhas. Para gerar este cartograma foram utilizadas somente 11 estações, as mesmas do cálculo dos parâmetros, ou seja, coordenadas consideradas como isentas de distorções originadas da materialização 1998, e a estação Chuá, ponto origem do SAD69. Comprova-se através desta figura, os impactos na adoção do SIRGAS como um novo sistema de referência terrestre para o Brasil, ocasiona alterações nas coordenadas planimétricas que poderão variar de 58 metros no nordeste, até 73 metros no extremo sul do país, acarretando uma variação máxima de 25 metros no contexto nacional.



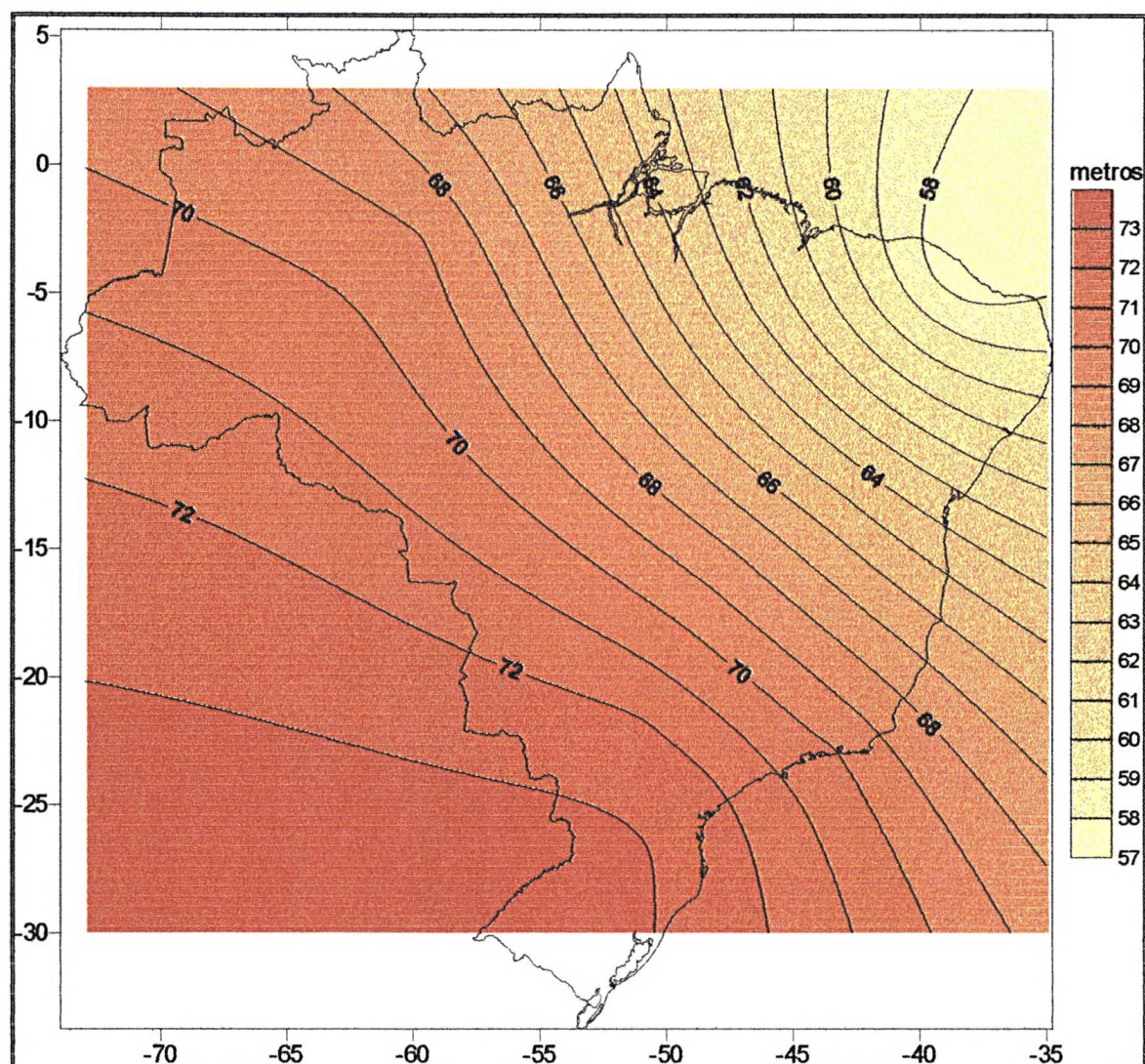


FIGURA 15 - ISOLINHAS REPRESENTANDO O DESLOCAMENTO HORIZONTAL ENTRE OS SISTEMAS DE REFERÊNCIA SAD69 – 1996 E SIRGAS.

#### 4.6 MODELAGEM DAS DISTORÇÕES – PROGRAMA ESTPM

A alternativa proposta para modelagem das diferenças entre as materializações dos dois sistemas, SAD69 – 1996 e SIRGAS, é a mesma adotada pelo programa ESTPM (Estimation of Secondary Terrestrial Positions for Mapping), desenvolvido pelo GSD, cuja versão atual é conhecida por NTv2 (National Transformation Software Package: NAD27 - NAD83).

O ESTPM foi desenvolvido para estimar correções às coordenadas geodésicas através de uma técnica confiável e uniforme que prediz a diferença de coordenadas para quaisquer pontos até os que não são coincidentes com a rede estabelecida. Originalmente ele realizava a tarefa de transformação de coordenadas entre NAD27 (North American Datum 1927) / NAD83 (North American Datum 1983) e vice versa, através da transformação de similaridade associada a aplicação da modelagem de distorções, fruto das diferenças de materialização encontrada entre os sistemas. Algumas modificações foram feitas objetivando a sua utilização com dados da rede brasileira, como por exemplo, o aumento na dimensão dos vetores e parâmetros de transformação (aqueles estimados na seção 4.5).

Operacionalmente o programa trabalha da seguinte forma:

1. Inicialmente é aplicada às coordenadas uma transformação conforme. O objetivo na aplicação da transformação conforme é manter a geometria da estrutura geodésica, ou seja manter, o relacionamento entre as coordenadas a serem transformadas. Sendo assim, fornecidos dois conjuntos de coordenadas pertencentes a todas estações comuns em ambas materializações, oriundas de ajustamentos SAD69 – 1996 e SIRGAS ( $SAD69_{AJD}$  e  $SIRGAS_{ADI}$ ), são aplicados ao conjunto de coordenadas  $SAD69_{AJD}$  os parâmetros de transformação estimados no item 4.5, obtendo-se coordenadas SIRGAS transformadas ( $SIRGAS_{TRANS}$ ).
2. Em uma segunda aproximação as diferenças existentes entre as coordenadas  $SIRGAS_{TRANS}$  e  $SIRGAS_{AJD}$  serão tratadas através de uma modelagem polinomial que representará as tendências regionais fornecidas pelos vetores de correção nas estações de controle. Serão usadas para a modelagem, apenas as estações de controle existentes dentro dos limites pré-estabelecidos, representando a área a ser modelada. Sendo assim, a partir dos conjuntos de coordenadas  $SIRGAS_{TRANS} = (X_i^1, Y_i^1)$  e  $SIRGAS_{AJD} = (X_i^2, Y_i^2)$ , são calculadas correções, que serão utilizadas na interpolação de um ponto qualquer que não pertence ao conjunto  $SIRGAS_{TRANS}$  e  $SIRGAS_{AJD}$ , conforme a formulação abaixo:

Seja,

$X_0$  = latitude média das estações de controle;

$Y_0$  = longitude média das estações de controle;

$U_i$  = diferenças em latitude das estações de controle SIRGAS<sub>TRANS</sub> e SIRGAS<sub>AJD</sub>;

$V_i$  = diferenças em longitude das estações de controle SIRGAS<sub>TRANS</sub> e SIRGAS<sub>AJD</sub>;

$U_0$  = média das diferenças em latitude;

$V_0$  = média das diferenças em longitude;

$S_x$  = fator de escala em latitude;

$S_y$  = fator de escala em longitude;

$S_u$  = fator de escala das diferenças em latitude;

$S_v$  = fator de escala das diferenças em longitude;

$X_{\max}^1$  = latitude máxima das estações de controle;

$Y_{\max}^1$  = longitude máxima das estações de controle;

$U_{\max}$  = valor máximo das diferenças em latitude das estações de controle;

$V_{\max}$  = valor máximo das diferenças em longitude das estações de controle;

$np$  = número de estações de controle (i).

$$X_0 = \sum X_i^1 / np ; \quad Y_0 = \sum Y_i^1 / np ; \quad (75)$$

$$U_i = X_i^2 - X_i^1 ; \quad V_i = Y_i^2 - Y_i^1 \quad (76)$$

$$U_0 = \sum U_i / np ; \quad V_0 = \sum V_i / np ; \quad (77)$$

$$S_x = 1 / X_{\max}^1 ; \quad S_y = 1 / Y_{\max}^1 ; \quad (78)$$

$$S_u = 1 / (U_{\max}^2 - U_0^2)^{1/2} ; \quad S_v = 1 / (V_{\max}^2 - V_0^2)^{1/2} ; \quad (79)$$

$$S_{U0} = \max ( X_i^2 - X_i^1 ) ; \quad S_{V0} = \max ( Y_i^2 - Y_i^1 ) ; \quad (80)$$

$$Zx_i = S_x ( X_i^1 - X_0 ) ; \quad Zy_i = S_y ( Y_i^1 - Y_0 ) ; \quad (81)$$

$$Ex_i = S_u ( U_i - U_0 ) ; \quad Ey_i = S_v ( V_i - V_0 ) ; \quad (82)$$

As correções estimadas em uma estação qualquer P, são baseadas na média ponderada das correções das coordenadas estimadas para todos os pontos de controle em torno de dele. A correção em qualquer latitude e longitude é dada por:

$$Cx_i = \sum w_i Ex_i / \sum w_i ; \quad Cy_i = \sum w_i Ey_i / \sum w_i \quad (83)$$

Onde  $Ex_i$  e  $Ey_i$  são as correções nos pontos de controle  $i$ , segundo latitude e longitude, respectivamente. O peso ( $w_i$ ) designado a cada ponto de controle  $i$  é função da distância ( $d_i$ )



entre o ponto de controle e o ponto onde serão estimadas as correções e a distância ( $k$ ) de seleção dos pontos de controle para interpolação (FIGURA 16). O peso é calculado através da seguinte fórmula:

$$w_i = e^{-(d_i/k^2)} ; \quad (84)$$

$$d_i = Zx_i Zy_i$$

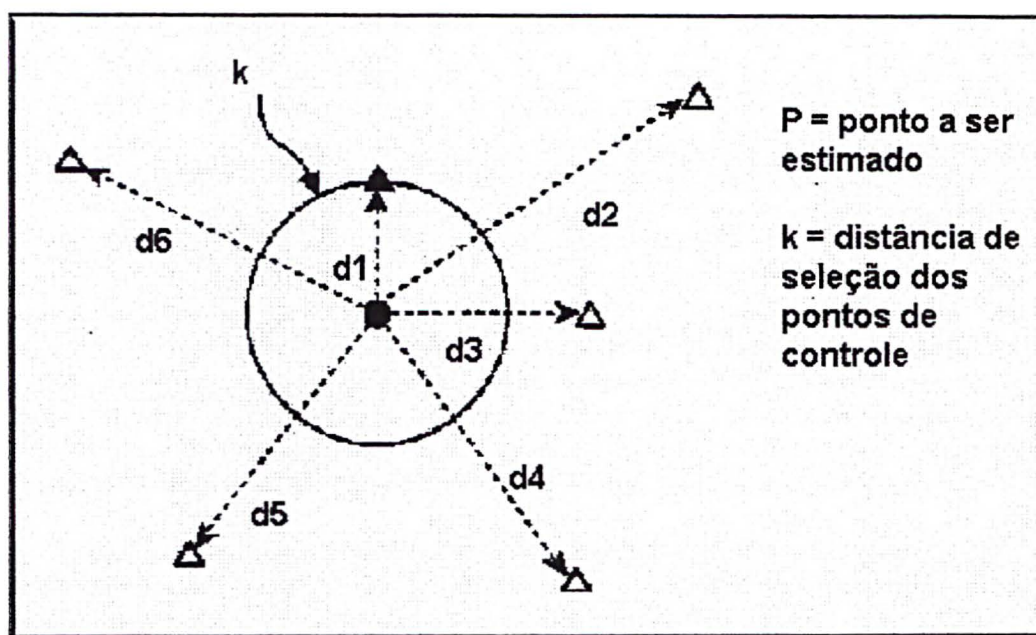


FIGURA 16 - PARÂMETROS DE ESTIMATIVA DA MÉDIA PONDERADA EM UM PONTO QUALQUER – PROGRAMA ESTPM. [fonte: JUNKINS & ERICKSON, 1996].

Os resíduos em latitude e longitude ( $Rx_i$  e  $Ry_i$ ), estimados para cada estação de controle são calculados por:

$$Rx_i = Fu_i + Cx_i - U_i ; \quad Ry_i = Fv_i + Cy_i - V_i \quad (85)$$

Onde:

$$Fu_i = U_i - Ex_i / S_u ; \quad Fv_i = V_i - Ey_i / S_v \quad (86)$$

Para uma melhor visualização das distorções entre  $SIRGA_{TRANS}$  e  $SIRGA_{ADJ}$ , foram gerados dois tipos de cartogramas. O primeiro contém os valores de distorções em espaçamentos de  $30' \times 30'$ , apresentado na FIGURA 17, enquanto o segundo

cartograma (FIGURA 18) são apresentadas na forma vetorial para a verificação do seu comportamento em termos de direção.

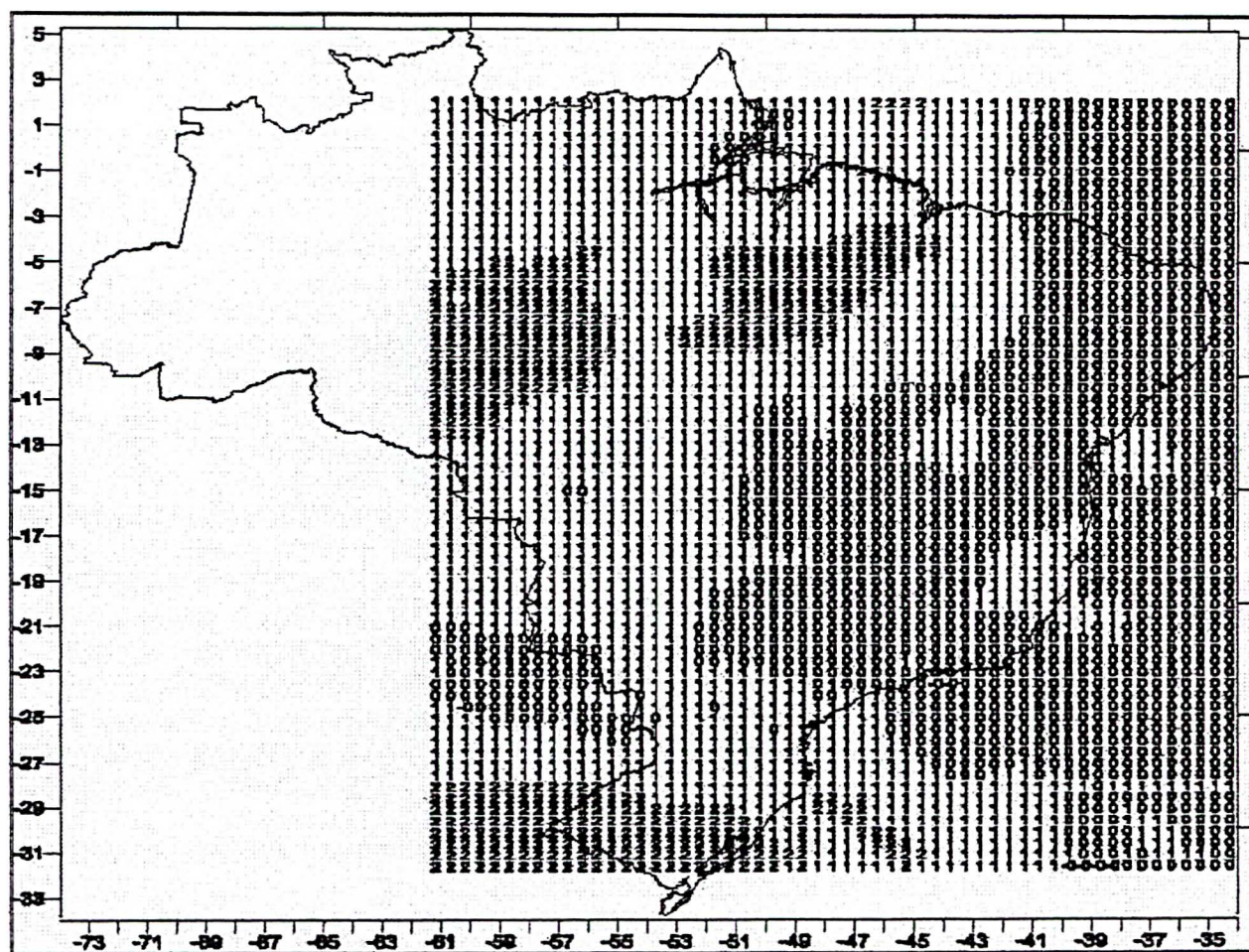


FIGURA 17 - DIFERENÇAS EM METROS ENTRE AS MATERIALIZAÇÕES 1996 E 1998, SEGUNDO ESPAÇAMENTOS DE 30'X 30'.



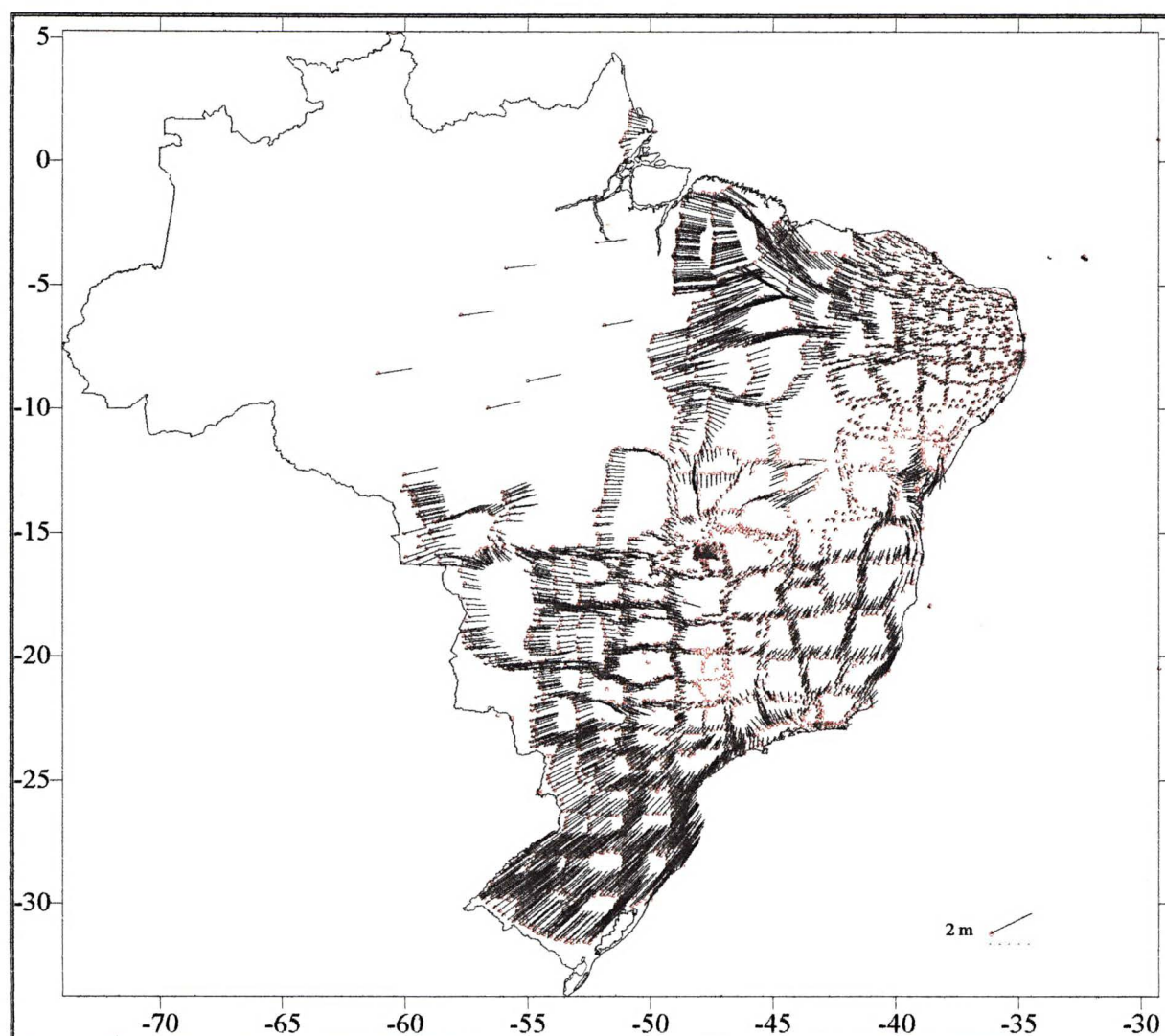


FIGURA 18 - VETORES REPRESENTANDO O DESLOCAMENTO HORIZONTAL ENTRE AS MATERIALIZAÇÕES 1996 E 1998.

#### 4.7 TESTES E RESULTADOS

Uma comprovação básica na aplicação de qualquer modelo matemático, é a sua habilidade em reproduzir o comportamento do fenômeno que está sendo modelado. Com relação à modelagem de distorções entre dois conjuntos de coordenadas, as diferenças remanescentes (resíduos) após a aplicação do modelo fornecem a verificação do seu desempenho. Ambos, magnitude e distribuição espacial dos resíduos são importantes.

Geralmente um bom modelo conduz a pequenos resíduos, bem como o oposto também é verdadeiro.

Como teste na aplicação deste procedimento foram utilizadas 34 estações espalhadas nas áreas de maiores distorções da rede brasileira (FIGURA 19). Estas estações não pertencem aos conjuntos de estações utilizadas para gerar o modelo de distorções. Na escolha das estações teste, selecionou-se também aquelas estabelecidas por GPS, com o objetivo de verificar o atendimento deste procedimento com este segmento de usuários.

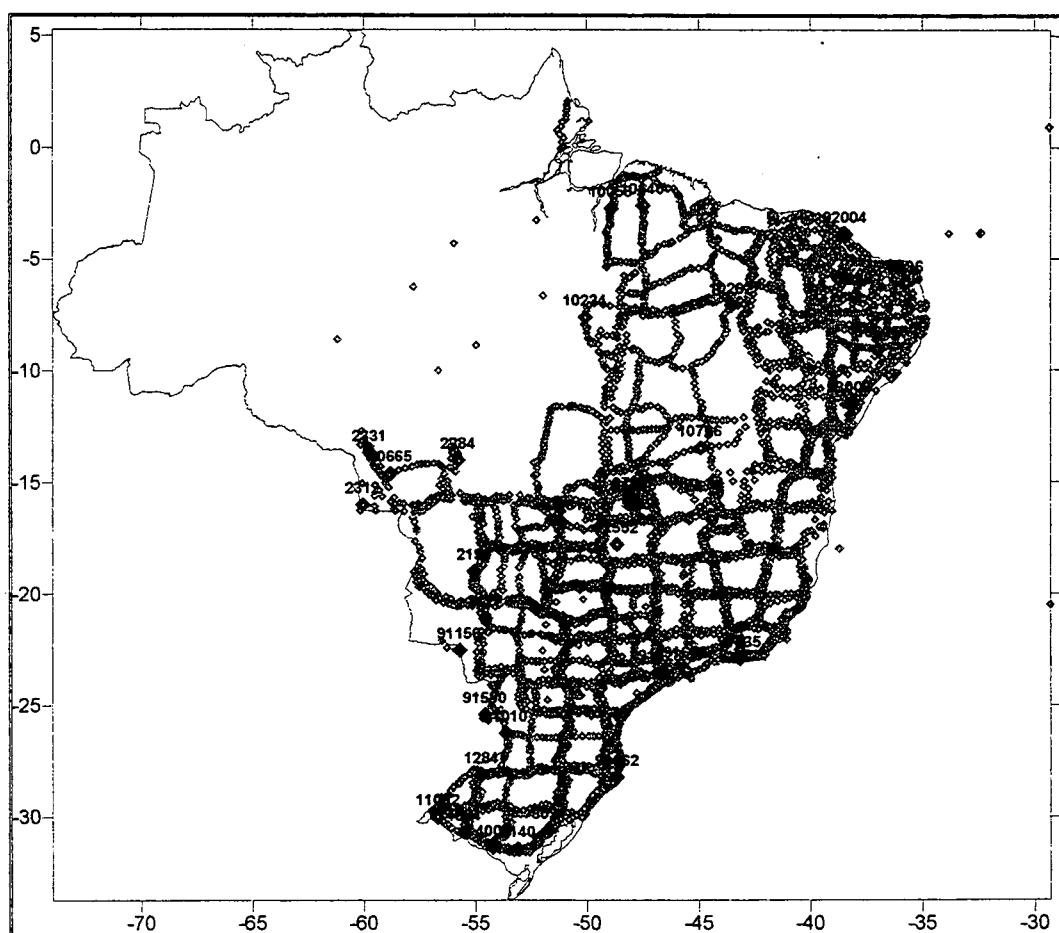


FIGURA 19 - DISTRIBUIÇÃO DAS ESTAÇÕES ESCOLHIDAS NA APLICAÇÃO DA MODELAGEM DE DISTORÇÕES.

A área teste abrange os limites:  $+04^{\circ}00' \leq \phi \leq -32^{\circ}$  e  $-62^{\circ} \leq \lambda \leq -35^{\circ}$ . O grau do polinômio escolhido para o cálculo dos coeficientes foi 5 e 10 (os polinômios de grau 20 fornecem a mesma solução de grau 10). A distância de seleção dos pontos de controle foi testada em dois valores: 0,025 e 0,010.

Os resultados aqui apresentados, são referidos a transformação de SAD69-1996, para SIRGAS. Na TABELA 17 é apresentado na primeira coluna a identificação da estação, nas três colunas seguintes as magnitudes dos vetores de diferenças de coordenadas entre SAD69-1996 e SIRGAS<sub>ADJ</sub> e o desvio padrão em coordenadas para cada componente horizontal (latitude e longitude). Nas três últimas colunas são apresentadas as magnitudes dos vetores das distorções após a aplicação dos parâmetros de transformação calculados na seção 4.5. Através destes resultados verifica-se que a transformação de sete parâmetros apresenta resultados estatísticos ligeiramente melhores do que na aplicação de 4 e 3 parâmetros. Segundo VANICEK & KRAKIWSKY [1996], não se deve considerar o parâmetro de escala como parte da transformação entre sistemas, porque a diferença em escala representa uma distorção sistemática oriunda da materialização. Como os valores estimados para as rotações são desprezíveis (vide seção 4.5), estes foram desconsiderados quando na aplicação do ESTPM para transformação de coordenadas, combinado à modelagem de distorções.

TABELA 17 – DIFERENÇAS (EM COORDENADAS) OBTIDAS ANTES DA APLICAÇÃO DOS PARÂMETROS DE TRANSFORMAÇÃO SAD69-1996 / SIRGAS E DIFERENÇAS OBTIDAS APÓS A APLICAÇÃO DA TRANSFORMAÇÃO.

\* diferenças entre SAD69 - 1996 e SIRGAS

\*\* desvios padrão das coordenadas (latitude e longitude)

\*\*\* resíduos encontrados após a aplicação dos parâmetros de transformação, em ensaios de 3, 4 e 7 parâmetros.

ESTAÇÃO	DIF.*	$\sigma\phi$ ** (metros)	$\sigma\lambda$ **	Transf. 3 par. (metros)***	Transf. 4 par. (metros)***	Transf. 7 par. (metros)***
1284 RESERVA	74,52	0,4707	0,5209	0,408	0,369	0,396
3091 QUINTO	74,42	0,4957	0,5443	0,415	0,365	0,393
4024 CHAPADÃO	75,13	0,5459	0,5932	0,486	0,436	0,468
11082 SH-21-1013	75,22	0,5784	0,6465	0,486	0,437	0,469
11010 SG-22-1005	73,85	0,4002	0,4002	0,401	0,371	0,395
3140CAPÃO GRANDE	74,85	0,5409	0,5940	0,451	0,398	0,429
4006 HORIZONTE	75,02	0,5398	0,5835	0,476	0,424	0,455
2331 VILA OESTE	71,97	0,4355	0,4223	0,827	0,770	0,775
10665 SD-21-304-N	71,81	0,4355	0,4223	0,988	0,935	0,941
2284 TENORIO	70,46	0,3913	0,3445	1,042	1,003	1,004
10801 SE-22-1-C	70,22	0,4112	0,3752	0,365	0,353	0,358
2127 ELDORADO I	72,77	0,3995	0,3539	0,447	0,426	0,443
2199CAMPOLIMPO	72,24	0,4394	0,4135	0,584	0,558	0,572



2312	PEDRINHA	72,96	0,6604	0,6527	0,790	0,740	0,756
10234	SB-22-302-V	64,69	0,6679	0,6429	1,432	1,425	1,409
10058	SA-22-1022	62,80	0,6039	1,241	0,573	0,529	0,505
10615	SC-24-1020	59,76	0,3512	0,3252	0,155	0,119	0,094
10262	SB-23-1-W	62,01	0,3445	0,4009	0,539	0,528	0,507
10766	SD-23-4-J	66,95	0,3564	0,3271	0,807	0,794	0,793
10140	SA-23-5-M	61,84	0,4443	0,7143	0,408	0,378	0,351
9226	ANA	58,76	0,2787	0,3155	0,248	0,223	0,195
9536	SERRA CAIADA	57,19	0,3259	0,3411	0,302	0,255	0,226
92552		69,67	0,0111	0,0492	0,449	0,448	0,452
93008		62,05	0,0225	0,0538	0,189	0,146	0,140
92004		57,11	0,0045	0,0078	0,125	0,107	0,077
91135		68,56	0,0017	0,0019	0,049	0,047	0,050
91156		73,65	0,1280	0,4194	0,054	0,037	0,017
90204		62,86	0,0579	0,2131	0,178	0,122	0,092
9738DF-116=TAGUAT		68,60	0,0405	0,0645	0,050	0,046	0,049
9802	ROBERTO	68,60	0,0014	0,0016	0,049	0,045	0,049
91535		70,01	0,0010	0,0023	0,132	0,108	0,096
91580		74,13	0,0053	0,0088	0,078	0,072	0,048
91608		70,93	0,0095	0,0342	0,078	0,072	0,044
91662		73,51	0,1034	0,5435	0,117	0,101	0,077
91628		71,36	0,0113	0,0290	0,061	0,041	0,028
Desvio Padrão					0,328	0,323	0,329
Média					0,407	0,387	0,376
Valor Máximo					1,432	1,425	1,409

Na TABELA 18 são apresentados os resultados obtidos após a aplicação da modelagem de distorções no ESTPM, sendo que nas quatro últimas colunas, estão os resíduos após a aplicação de diferentes parâmetros de entrada do ESTPM. Através dos resultados estatísticos concluiu-se que o fator  $k$  tem uma influência maior que o número de coeficientes do polinômio. Na TABELA 19 são apresentadas as coordenadas finais SIRGAS transformadas, segundo a solução fornecida pelo número de 10 coeficientes e  $k=0,010$ .

TABELA 18 - DIFERENÇAS (EM COORDENADAS) OBTIDAS ANTES DA APLICAÇÃO DOS PARÂMETROS DE TRANSFORMAÇÃO SAD69-1996 / SIRGAS E DIFERENÇAS OBTIDAS APÓS A APLICAÇÃO DA TRANSFORMAÇÃO E MODELAGEM DAS DISTORÇÕES NO ESTPM.

\* diferenças entre SAD69 - 1996 e SIRGAS

\*\* desvios padrão das coordenadas (latitude e longitude)

\*\*\* resíduos encontrados após a aplicação dos parâmetros de transformação (ensaio de 3 parâmetros) e modelagem das distorções.

ESTAÇÃO	DIF.*	$\sigma\phi^{**}$ (metros)	$\sigma\lambda^{**}$	n° Coef. = 5 k=0,025 (metros)***	n° Coef. = 5 k=0,010 (metros)***	n° Coef. = 10 k=0,025 (metros)***	n° Coef. = 10 k=0,010 (metros)***
1284 RESERVA	74,52	0,4707	0,5209	0,001	0,000	0,002	0,000
3091 QUINTO	74,42	0,4957	0,5443	0,001	0,002	0,003	0,001
4024 CHAPADÃO	75,13	0,5459	0,5932	0,008	0,002	0,013	0,004
11082 SH-21-1013	75,22	0,5784	0,6465	0,023	0,006	0,033	0,010
11010 SG-22-1005	73,85	0,4002	0,4002	0,001	0,000	0,002	0,001
3140 CAPÃO GRANDE	74,85	0,5409	0,5940	0,003	0,003	0,003	0,004
4006 HORIZONTE	75,02	0,5398	0,5835	0,006	0,003	0,006	0,003
2331 VILA OESTE	71,97	0,4355	0,4223	0,007	0,002	0,002	0,002
10665 SD-21-304-N	71,81	0,4355	0,4223	0,030	0,001	0,027	0,000
2284 TENORIO	70,46	0,3913	0,3445	0,026	0,009	0,024	0,008
10801 SE-22-1-C	70,22	0,4112	0,3752	0,056	0,053	0,057	0,053
2127 ELDORADO I	72,77	0,3995	0,3539	0,001	0,002	0,001	0,002
2199 CAMPO LIMPO	72,24	0,4394	0,4135	0,007	0,003	0,008	0,003
2312 PEDRINHA	72,96	0,6604	0,6527	0,010	0,002	0,007	0,002
10234 SB-22-302-V	64,69	0,6679	0,6429	0,080	0,004	0,079	0,004
10058 SA-22-1022	62,80	0,6039	1,241	0,005	0,002	0,004	0,002
10615 SC-24-1020	59,76	0,3512	0,3252	0,007	0,003	0,007	0,003
10262 SB-23-1-W	62,01	0,3445	0,4009	0,045	0,024	0,045	0,024
10766 SD-23-4-J	66,95	0,3564	0,3271	0,013	0,002	0,013	0,002
10140 SA-23-5-M	61,84	0,4443	0,7143	0,045	0,011	0,046	0,012
9226 ANA	58,76	0,2787	0,3155	0,012	0,006	0,012	0,007
9536 SERRA CAIADA	57,19	0,3259	0,3411	0,006	0,001	0,005	0,001
92552	69,67	0,0111	0,0492	0,104	0,000	0,104	0,000
93008	62,05	0,0225	0,0538	0,031	0,009	0,031	0,009
92004	57,11	0,0045	0,0078	0,012	0,005	0,011	0,006
91135	68,56	0,0017	0,0019	0,017	0,018	0,017	0,018
91156	73,65	0,1280	0,4194	0,003	0,000	0,003	0,001
90204	62,86	0,0579	0,2131	0,002	0,005	0,028	0,001
9738DF-116=TAGUAT	68,60	0,0405	0,0645	0,009	0,011	0,009	0,011
9802 ROBERTO	68,60	0,0014	0,0016	0,018	0,019	0,018	0,019
91535	70,01	0,0010	0,0023	0,002	0,002	0,002	0,001
91580	74,13	0,0053	0,0088	0,047	0,001	0,047	0,001
91608	70,93	0,0095	0,0342	0,153	0,046	0,153	0,046

91662	73,51	0,1034	0,5435	0,232	0,126	0,233	0,125
91628	71,36	0,0113	0,0290	0,105	0,052	0,105	0,052
Desvio Padrão				0,049	0,024	0,049	0,024
Média				0,032	0,012	0,033	0,013
Valor Máximo				0,232	0,126	0,233	0,125

As duas primeiras colunas da TABELA 19, contém as coordenadas SAD69-1996, as duas colunas do meio as coordenadas SIRGAS<sub>ADJ</sub> e as duas últimas colunas as coordenadas SIRGAS<sub>TRANS</sub> estimadas no programa ESTPM (aplicação da modelagem de distorções), na materialização 1998.

TABELA 19 - RESULTADOS OBTIDOS ANTES E APÓS A TRANSFORMAÇÃO NO ESTPM.

ESTAÇÃO	COORDENADAS SAD69 – 1996 (SAD69 <sub>ADJ</sub> )		COORDENADAS SIRGAS (SIRGAS <sub>ADJ</sub> )		SIRGAS TRANSFORMADO NO ESTPM (SIRGAS <sub>TRANS</sub> )	
	$\varphi$	$\lambda$	$\varphi$	$\lambda$	$\varphi$	$\lambda$
1284 RESERVA	S28 6 28,9314	54 44 2,0582	S28 06 30,6559	54 44 3,9743	S28 6 30,6559	54 44 3,9743
3091 QUINTO	S30 37 3,0400	51 40 28,4993	S30 37 4,8292	51 40 30,3775	S30 37 4,8292	51 40 30,3775
4024 CHAPADÃO	S30 41 47,1811	55 30 49,5899	S30 41 48,9165	55 30 51,5740	S30 41 48,9166	55 30 51,5741
11082 SH-21-1013	S30 00 9,1771	56 42 2,5748	S30 00 10,8899	56 42 4,5761	S30 00 10,890	56 42 4,5762
11010 SG-22-1005	S26 15 42,4857	53 37 56,3448	S26 15 44,2062	53 37 58,2001	S26 15 44,2062	53 37 58,2001
3140CAPÃOGRANDE	S31 27 5,4970	53 04 21,1560	S31 27 7,2739	53 04 23,0897	S31 27 7,2738	53 4 23,0897
4006HORIZONTE	S31 23 35,2450	54 12 32,8952	S31 23 37,0049	54 12 34,8586	S31 23 37,0050	54 12 34,8586
2331VILA OESTE	S13 40 40,4074	59 43 43,5938	S13 40 41,9037	59 43 45,4362	S13 40 41,9038	59 43 45,4362
10665 SD-21-304-N	S14 35 59,2257	58 47 33,5030	S14 36 ,74380	58 47 35,3268	S14 36 ,7438	58 47 35,3269
2284 TENORIO	S14 01 16,2003	55 46 20,9212	S14 01 17,7316	55 46 22,6685	S14 1 17,7313	55 46 22,6686
10801 SE-22-1-C	S16 47 13,7380	51 07 36,6553	S16 47 15,3535	51 07 38,3317	S16 47 15,3539	51 7 38,3300
2127 ELDORADO I	S21 05 43,4102	54 33 4,5352	S21 05 45,0601	54 33 6,3422	S21 5 45,0601	54 33 6,3422
2199CAMPO LIMPO	S18 59 57,9210	55 02 28,9116	S18 59 59,5385	55 02 30,7032	S18 59 59,5385	55 2 30,7031
2312 PEDRINHA	S16 00 57,7283	60 02 32,7757	S16 00 59,2616	60 02 34,6489	S16 59,2616	60 2 34,6489
10234 SB-22-302-V	S07 37 5,7514	50 04 38,9511	S07 37 7,1737	50 04 40,5073	S 7 37 7,1738	50 4 40,5075
10058 SA-22-1022	S02 42 59,4271	48 54 32,7701	S02 43 ,75633	48 54 34,3150	S 2 43 ,7563	48 54 34,3151
10615 SC-24-1020	S09 02 9,2898	36 58 10,8053	S09 02 10,8076	36 58 12,0289	S 9 2 10,8077	36 58 12,0290
10262 SB-23-1-W	S07 04 25,1473	43 32 55,7639	S07 04 26,5982	43 32 57,1687	S 7 4 26,5983	43 32 57,1679
10766 SD-23-4-J	S13 28 5,8947	44 55 59,3301	S13 28 7,4941	44 56 ,8417	S13 28 7,4941	44 56 ,8417
10140 SA-23-5-M	S02 36 25,3346	47 29 6,7428	S02 36 26,6576	47 29 8,2519	S 2 36 26,6578	47 29 8,2521
9226 ANA	S06 38 59,3175	37 59 37,6196	S 6 39 ,76906	37 59 38,8656	S 6 39 ,7689	37 59 38,8655
9536SERRA CAIADA	S06 05 36,2482	35 43 21,3336	S06 05 37,6911	35 43 22,5090	S 6 5 37,6911	35 43 22,5090
92552	S17 47 39,6459	48 39 42,2080	S17 47 41,3015	48 39 43,8234	S17 47 41,3015	48 39 43,8234
93008	S11 31 11,8586	38 15 10,5776	S11 31 13,4358	38 15 11,8562	S11 31 13,4361	38 15 11,8563
92004	S03 52 33,3526	38 25 36,5294	S03 52 34,7198	38 25 37,7837	S 3 52 34,7199	38 25 37,7837
91135	S15 54 12,2317	47 50 54,0735	S15 54 13,8482	47 50 55,6618	S15 54 13,8487	47 50 55,6614
91156	S22 31 52,2922	55 44 4,3026	S22 31 53,9407	55 44 6,1720	S22 31 53,9407	55 44 6,1720
90204	N00 03 6,4072	51 04 8,1945	N00 03 5,1570	51 4 9,8041	N00 03 5,1569	51 4 9,8041
9738 DF116=TAGU	S15 47 42,4112	48 02 54,8956	S15 47 44,0243	48 2 56,4883	S15 47 44,0246	48 2 56,4881
9802 ROBERTO	S15 56 41,5489	47 53 3,5321	S15 56 43,1660	47 53 5,1218	S15 56 43,1665	47 53 5,1214
91535	S22 54 33,9208	43 10 44,1006	S22 54 35,7087	43 10 45,6207	S22 54 35,7087	43 10 45,6207

91580	S25 24 30,4409	54 34 50,4958	S25 24 32,1379	54 34 52,3786	S25 24 32,1379	54 34 52,3786
91608	S23 24 39,4206	45 35 35,5151	S23 24 41,1926	45 35 37,1133	S23 24 41,1912	45 35 37,1139
91662	S28 13 46,4287	48 39 13,8222	S28 13 48,2364	48 39 15,5840	S28 13 48,2349	48 39 15,5797
91628	S23 33 2,3098	46 43 40,8763	S23 33 4,07314	46 43 42,5109	S23 33 4,0715	46 43 42,5111

Conclui-se através das tabelas 19 e 20 que os resultados são satisfatórios na aplicação desta técnica, pois os resíduos obtidos estão em média dentro dos desvios padrão das coordenadas. Este fato também se verifica no caso de estações estabelecidas por GPS como por exemplo, as estações 92004, 91535 e 91580, cujos resíduos finais são da ordem de 3 milímetros, ou seja inferiores ao desvios padrão das coordenadas.

Apesar dos resultados apresentados neste capítulo, deve-se avaliar a utilização prática desta metodologia de integração. Como por exemplo, a aplicação da técnica GPS em um novo levantamento na obtenção de coordenadas SIRGAS e a necessidade de integra-lo em SAD69 decorrente da existência de um levantamento original. Com a aplicação do ESTPM como ferramenta de ligação entre os dois referenciais é preservado o relacionamento do levantamento original com as observações GPS. Neste caso a integridade das observações GPS serão degradadas acompanhando a distorção dos levantamentos originais. Se o objetivo for preservar a integridade das observações GPS, o relacionamento entre os levantamentos originais e as estações GPS será prejudicado, mas a precisão fornecida pelo GPS será mantida. A TABELA 20 esclarece o impasse relatado.

TABELA 20 – VANTAGENS E DESVANTAGENS DOS PROCEDIMENTOS DE TRANSFORMAÇÃO ENTRE SISTEMAS DE REFERÊNCIA TERRESTRES.

Procedimento de integração usando coordenadas derivadas de GPS em SAD69	vantagens	desvantagens
Programa ESTPM (Transformação de Similaridade + Modelagem das Distorções)	Preserva o relacionamento local entre os pontos levantados por GPS e os levantamentos originais	Pode degradar a integridade de observações GPS
Transformação de Similaridade	Preserva a integridade das observações GPS	Pode degradar o relacionamento local entre os pontos levantados por GPS e levantamentos originais

A existência de um relacionamento entre a rede de controle existente e os dados no sistema de informação espacial, é uma consideração que também precisa ser feita na adoção de um processo de transformação que incorpora a modelagem de distorções. Na maioria dos casos, tal relacionamento existe porque os dados de um GIS são derivados da digitalização de mapas e plantas baseadas nas coordenadas da rede de controle, pelo cálculo direto ou também baseado em informações obtidas em levantamentos existentes. Se isto for verdadeiro, deduz-se que a distorção na rede de controle será refletida aos dados compilados e portanto, um processo de transformação baseado na distorção da rede de controle será aplicado com sucesso.

A utilização da modelagem de distorções, seja ela em qualquer alternativa proposta não melhora a precisão das coordenadas de uma determinada estação que está sendo submetida a este procedimento na integração a outro referencial. A precisão das coordenadas de uma estação está relacionada somente com a técnica observacional utilizada no estabelecimento da estação. Portanto, se uma estação de poligonal ou vértice de triangulação for integrado ao SIRGAS através deste ou outro procedimento qualquer, terá a sua precisão mantida. Em contrapartida, ocorrerá uma deterioração na precisão das coordenadas de uma estação estabelecida por GPS, a qual pretende ser integrada ao SAD69, na medida que a geometria das suas observações não forem mantidas, em detrimento da adequação à materialização em SAD69. Mais uma vez é necessário que esteja bem claro que a modelagem de distorções, como procedimento de integração, preserva apenas o relacionamento com o referencial a ser integrado.

A realização de estudos sobre parâmetros de transformação e modelagem de distorções não se esgota nestes resultados. Na verdade, existem inúmeros ensaios que podem ser realizados. Como por exemplo, ao invés de se usar o ESTPM, pode ser sugerido o uso do *software* SURFER, o qual possui vários modelos de superfícies e que poderiam ser testados, para verificação do mais adequado. Como também poderia ser adotado um outro critério para a seleção das estações no cálculo dos parâmetros de transformação. Porém este capítulo limitou-se somente em apresentar resultados da metodologia aqui proposta.

## **CAPÍTULO 5 - ESTIMATIVA DO CAMPO DE VELOCIDADES A PARTIR DAS ESTAÇÕES DA RBMC**

A terceira etapa do trabalho é dedicada à estimativa de um campo de velocidades para a porção ocupada pelo Brasil na placa Sul-americana, a partir dos vetores de velocidades estimados nas estações da RBMC. Em decorrência da proposta de adoção do SIRGAS como sistema de referência terrestre, faz-se necessário o monitoramento temporal das coordenadas que o materializam, caracterizando assim a sua concepção dinâmica. Os modelos geológicos e geofísicos de tectônica de placas também serão utilizados em comparações a serem feitas com as soluções fornecidas pela RBMC. Seguindo a proposta deste capítulo sua estrutura abrange os seguintes temas:

- (1) Motivação do estudo realizado;
- (2) Apresentação dos modelos de tectônica de placas;
- (3) Apresentação dos dados GPS utilizados no estudo;
- (4) Apresentação de resultados fornecidos pela solução geodésica (RBMC);
- (5) Comparações entre os resultados fornecidos pelos modelos de tectônica de placas e soluções geodésicas (RBMC, RNAAC SIR e ITRF96);
- (6) Análise da variação intra-placa (SOAM), com os resultados fornecidos pela solução RBMC;
- (7) Estimativa dos elementos definidores do movimento de placas (coordenadas do polo e velocidade de rotação), utilizando somente vetores de velocidades estimados nas estações da RBMC.

### **5.1 MOTIVAÇÃO**

A crosta terrestre é segmentada em diversas partes que recebem a denominação de placas litosféricas. Em decorrência de aspectos geodinâmicos, estas placas se movem continuamente em diferentes direções com diferentes magnitudes, de acordo com a região em que estão localizadas. Como consequência deste movimento as coordenadas geodésicas de um ponto sobre uma das placas na crosta terrestre depende da época na qual a informação foi

obtida. Se estes elementos (magnitude e direção) forem conhecidos pode-se estabelecer a variação das coordenadas dos pontos localizados sobre as placas.

As estruturas geodésicas concebidas hoje em dia, através das técnicas espaciais de posicionamento de alta precisão, tais como o VLBI, SLR e GPS, possuem além das três componentes definidoras de um ponto no espaço, a componente de definição temporal, referindo-se à época das observações, assumindo, desta forma, um caráter de abrangência cinemática. Um exemplo disso é a rede de referência do SIRGAS, cujas coordenadas estão referidas à época 1995,4. O conjunto de estações que formam a RBMC possibilitam a obtenção diária das coordenadas, proporcionando assim, o acompanhamento do movimento temporal da posição destas estações, consistindo assim, em uma estrutura geodésica de concepção dinâmica.

A técnica GPS passou a contribuir nos estudos de Geodinâmica, juntamente com o VLBI e SLR, a partir da operacionalização do IGS em 1994 [LARSON et al, 1997]. Hoje em dia são mais de 180 estações que compõem a rede IGS fornecendo informações muito valiosas, no que tange ao monitoramento das coordenadas das estações com relação ao tempo. Cada estação IGS possui um receptor GPS geodésico que coleta informações dos satélites (observações de código e fase) por períodos de 24 horas. Com o objetivo de análise destas informações, grupos de pesquisa em instituições internacionais se dedicaram ao processamento diário das coordenadas das estações IGS. Posteriormente, estes resultados atrelados a diferentes, épocas são combinados, possibilitando assim, a estimativa do vetor velocidade para as respectivas estações. As velocidades derivadas das técnicas geodésicas são resultados mais realistas principalmente em regiões nas bordas das placas litosféricas onde a variação é considerável [DREWES, 1993].

No Brasil, a RBMC é uma estrutura com as mesmas características da rede IGS e está em funcionamento desde agosto de 1997 [FORTES, 1997]. Atualmente ela é uma importante ferramenta para integração do SGB aos sistemas de referência terrestres em uso pela comunidade internacional. A RBMC representa, também, a contribuição do Brasil na rede IGS, através da adoção de seus dados por um dos centros regionais de análise (RNNAC SIR)

IGS, promovendo desta forma, a direta integração das estações geodésicas brasileiras ao ITRF [SEEMÜLLER & DREWES, 1997]. A análise da variação temporal das coordenadas das estações da RBMC através do processamento de seus dados GPS em um *software* científico, fornece um tratamento mais refinado ao cálculo do vetor velocidade para as estações envolvidas. A escolha do software Bernese versão 4.0 deve-se ao fato dele ser um *software* completo, contemplando a possibilidade de traçar estratégias, seja na utilização de modelos troposféricos mais adequados ou na aplicação de modelagens para resolução de ambigüidades.

Poucos estudos foram desenvolvidos na América do Sul [DREWES, 1997b], [DGFI, 1998b] e [DGFI, 1998c], mais especificamente no Brasil, por ser uma região estável na placa SOAM. Procura-se também, conhecer a compatibilidade das informações fornecidas pelos modelos tectônica de placas, quando comparados com as informações obtidas através das técnicas espaciais, tais como o GPS, ou até mesmo a estimativa de um campo de velocidades através do GPS. Com os resultados obtidos no processamento da RBMC, serão realizadas várias análises e comparações com os modelos geofísicos de movimento de placas, como por exemplo o modelo NNR-NUVEL 1A [DEMETTS et al., 1990], [DEMETTS et al, 1994], o qual é baseado apenas em informações geológicas e fundamentado na teoria da tectônica de placas (a qual considera a variação de coordenadas com o tempo em caráter linear) [DREWES, 1982]. O modelo geodésico usado na comparação é o APKIM8.80 [DREWES, 1993], o qual é baseado em observações de VLBI, SLR e GPS realizadas nas últimas décadas, contribuindo, deste modo com informações mais recentes sobre o movimento de placas litosféricas. Entretanto, as velocidades resultantes do processamento da RBMC seriam uma solução mais confiável para a redução das coordenadas de qualquer estação no Brasil em diferentes épocas, evitando assim a utilização de modelos geofísicos. Soluções geodésicas fornecidas pelo ITRF96 e RNNAC SIR (Regional Network Associate Analysis Centers SIRGAS), também foram utilizadas nas comparações. Através do conjunto de vetores de velocidades das estações da RBMC (os quais vem a formar o campo de velocidades) são estimados os elementos definidores do movimento da placa SOAM. Estas informações também são comparadas com aquelas fornecidas pelos modelos geofísicos.

## 5.2 MODELAGEM GEODÉSICA DA TECTÔNICA DE PLACAS



A geodésia clássica é baseada no princípio de redes geodésicas de coordenadas “fixas”<sup>1</sup>, para descrever a forma e a superfície terrestre. Na medida em que as observações geodésicas melhoram ao nível centimétrico, com o uso das técnicas espaciais no posicionamento geodésico, as coordenadas das estações passaram a ser dependentes do tempo. Sendo assim, deve-se considerar suas variações, as quais são decorrentes de deformações que se manifestam na superfície da Terra. Esta relação de dependência das coordenadas com o tempo é representada pelos modelos de deformação da superfície terrestre.

Os modelos de deformação global são derivados de observações geofísicas e baseados na teoria da tectônica de placas desenvolvida na década de 70. Eles fornecem velocidades de superfície através da geometria de um conjunto de placas rígidas e estimam seus parâmetros de movimento como a rotação de uma capa esférica indeformável. Os modelos de deformação regional vem a representar as deformações intra-placas, ou seja, as deformações dentro das placas rígidas ao longo de falhas ativas e cadeias de montanhas [DREWES, 1993].

A teoria da tectônica de placas está baseada principalmente em levantamentos geológicos e geofísicos que representam uma média sobre milhões de anos. A primeira observação sobre a qual está fundamentada a teoria da tectônica de placas é o espalhamento do solo oceânico, gerado nas dorsais oceânicas, pela contribuição de um novo material que aflora na superfície procedente das correntes de convecção térmica no manto [DREWES, 1993]. Quando este material se esfria à temperatura por volta de 500 °C, ele é magnetizado na direção do campo magnético da Terra daquela época. Como o campo magnético troca os pólos em intervalos de milhares a milhões de anos, encontram-se rochas de magnetização alternadas no fundo dos oceanos na forma de tiras paralelamente à cadeia meso-oceânica. Medindo a distância entre as tiras e estimando-se o tempo de magnetização, calcula-se a velocidade do espalhamento do solo oceânico, o qual é a velocidade relativa entre duas placas divergentes. O eixo do espalhamento do solo oceânico, por exemplo, a cadeia meso-oceânica, não é uma linha contínua, mas interrompida por deslocamentos retangulares. Tal discontinuidade é inevitável quando move-se paralelamente com velocidade linear sobre a esfera. Estas linhas de

---

<sup>1</sup> No sentido de serem invariáveis com o tempo.

deslocamento são denominadas de falhas transformantes. Elas são de importância fundamental para a tectônica de placas a medida que seu azimuth é a direção do movimento das placas. A determinação dos azimuths de falhas transformantes representa outro dado geofísico para a tectônica de placas. O terceiro e importante grupo de observações são os azimuths de vetores de terremotos. Os deslocamentos decorrentes de um terremoto não representam o movimento real de uma placa devido as deformações locais. Estima-se neste caso a orientação de um plano de falha a partir de uma análise de mecanismo de foco. As soluções de plano de falha avaliam os registros de uma rede de estações sismológicas, e determinam o azimuth do vetor a partir de um movimento detectado inicialmente [DREWES, 1993]. Os três fenômenos explicados anteriormente formam a base geofísica dos modelos cinemáticos de placas litosféricas.

O modelo geofísico indicado pelo IERS é o NNR-NUVEL-1 ou ainda a sua recente atualização NNR-NUVEL-1A [DEMELTS et al., 1994]. O NUVEL-1 combina variações de anomalias magnéticas, azimuths de falhas, vetores de terremotos e espalhamento do solo oceânico para estimar velocidades relativas das placas. Estes modelos são concebidos sobre o conceito de “rede não rotante” (No Net Rotation - NNR), o qual parte da condição de que não existem torques na litosfera<sup>2</sup>, ou seja, a integral de  $\mathbf{v} \times \mathbf{r}$  sobre a superfície da Terra é zero (onde  $\mathbf{v}$  é a velocidade da placa na posição  $\mathbf{r}$ ). Neste conceito a ligação litosfera e astenosfera<sup>3</sup> é considerada uniforme e sem torques. Esta condição (imposta) seria verdadeira se a litosfera e astenosfera tivessem a mesma espessura em qualquer lugar e não existissem variações laterais na estrutura da viscosidade. O fluxo da astenosfera também afeta os torques nas placas individuais e em alguns casos diferem na direção das velocidades das placas.

Alguns pesquisadores, DREWES [1993] e LARSON [1997] apontam desvantagens na utilização dos modelos geofísicos, sendo elas:

---

<sup>2</sup> Camada superficial da Terra, que compreende a corsta terrestre e parte superior do manto, com espessura variando de 10 a 100 km.

<sup>3</sup> Camada abaixo da litosfera, de profundidade até 200 km, onde as rochas estão parcialmente fundidas. Faz parte do manto superior.

- Suas informações vêm de limites de placas litosféricas onde ocorrem grandes deformações, não representando o verdadeiro comportamento em regiões centrais das placas;
- As velocidades são extrapoladas a partir de informações referentes a eras geológicas, sendo uma incógnita como seria a representação na época atual;
- Instabilidades, como por exemplo, terremotos, são representados por uma função contínua.

Sendo assim, uma alternativa é estabelecer ou optar pela utilização de modelagem geodésica de placas. Através do monitoramento de pequenos deslocamentos na crosta terrestre, pela repetição de observações geodésicas precisas (técnicas espaciais) são descritos os movimentos das placas durante as últimas décadas. Um exemplo destes modelos é o APKIM8.8, desenvolvido no DGFI. O cálculo deste modelo segue a mesma conceituação dos modelos geofísicos relatados anteriormente, nos quais são feitas as seguintes considerações [DREWES, 1982]:

- A Terra é um corpo rígido rotante em torno de seu eixo;
- A superfície deste corpo é coberta por um conjunto de placas litosféricas, as quais se comportam consistentemente com elas mesmas (ou seja não são considerados os movimentos intra-placas), mas possuem um movimento relativo entre elas;
- O movimento relativo de uma placa (uma calota esférica rígida) em um determinado sistema de referência (transformação ativa – seção 2.4), é descrito por um vetor de rotação denominado vetor de Euler (vetor geocêntrico de rotação). O módulo do vetor de Euler é proporcional à velocidade angular no extremo do vetor, localizado na crosta terrestre, chamado de pólo de Euler (ou pólo de rotação). Esse vetor ( $\vec{\Omega}$ ) pode ser representado em um sistema de coordenadas cartesianas através das três componentes  $\Omega_x$ ,  $\Omega_y$  e  $\Omega_z$ , ou em um sistema esférico através das coordenadas (geodésicas) do pólo de rotação ( $\Phi$ ,  $\Lambda$ ) e a velocidade de rotação da placa ( $\omega$ ). Sendo assim, o problema geométrico do movimento das placas consiste em estabelecer o pólo de rotação de cada placa e sua velocidade angular. A partir das observações descritas, pode-se estimar vetores de rotação por simples cálculos esféricos. As figuras 20 e 21 apresentam os relacionamentos entre os elementos

que definem o movimento (P em coordenadas esféricas) de um ponto qualquer P na superfície da Terra.

- Como os movimentos das placas litosféricas ( $\Delta x$ ) são muito pequenos com relação ao raio da Terra ( $r$ ), a figura da Terra é representada por uma esfera. Sendo assim, o ângulo geocêntrico  $\Delta\psi$ , correspondente ao movimento superficial do ponto, é constante para pontos localizados na mesma latitude:  $\Delta x = r \Delta\psi$ .

O movimento ( $\Delta\vec{x}_i$ ) de um ponto  $P_i(\vec{x}_i)$  sobre a placa  $k$  em um intervalo de tempo  $\Delta t$ , é dado por:

$$\Delta\vec{x}_i = (\vec{\Omega}_k \times \vec{x}_i) \Delta t, \quad (87)$$

onde  $\Delta\vec{x}$ ,  $\vec{\Omega}_k$ ,  $\vec{x}_i$  podem ser definidos em um sistema de referência arbitrário. No caso da adoção de um sistema de coordenadas esféricas, representa-se o vetor de rotação  $\vec{\Omega}_k$  através de  $\phi_k$  e  $\Lambda_k$  e da velocidade de rotação  $\omega_k$ . O vetor  $\vec{x}_i$  passa a ser representado pela latitude e longitude geodésicas ( $\phi_i$  e  $\lambda_i$ ) e os deslocamentos do ponto  $P_i$  por  $\Delta\phi_i$  e  $\Delta\lambda_i$  (vide FIGURA 20). Derivando a equação (87) com respeito a um intervalo de tempo  $\Delta t$  é encontrado o relacionamento entre os pequenos deslocamentos  $\Delta\phi$  e  $\Delta\lambda$  e os parâmetros da placa ( $\phi$ ,  $\Lambda$ ,  $\omega$ ) obtendo-se [DREWES, 1993]:

$$\begin{aligned} \Delta\phi_i &= d\phi/dt = \omega_k \cos \Phi_k \sin(\lambda_i - \Lambda_k) \\ \Delta\lambda_i &= d\lambda/dt = \omega_k (\sin\phi_k - \cos(\lambda_i - \Lambda_k) \tan\phi_i \cos \phi_k) \end{aligned} \quad (88)$$

Representando o deslocamento em um sistema cartesiano tem-se [MCCARTHY, 1996]:

$$\begin{aligned} \Delta x &= dx/dt = \Omega_y Z - \Omega_z Y \\ \Delta y &= dy/dt = \Omega_z X - \Omega_x Z \\ \Delta z &= dz/dt = \Omega_x Y - \Omega_y X \end{aligned} \quad (89)$$

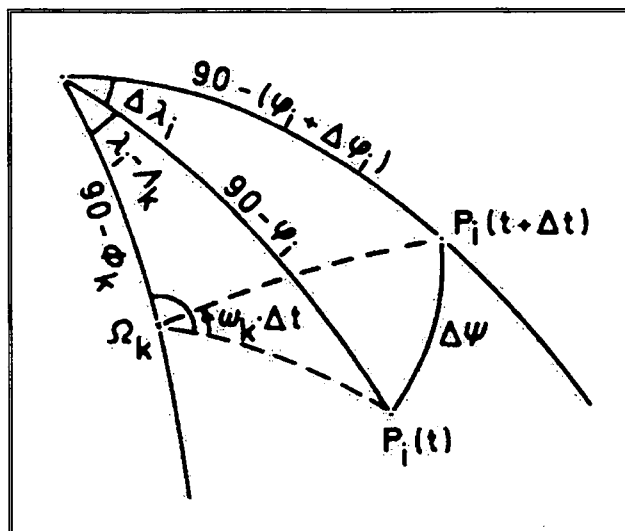


FIGURA 20 - RELAÇÕES GEOMÉTRICAS ENTRE AS OBSERVÁVEIS GEODÉSICAS  $\bar{\Delta x}(\Delta\phi, \Delta\lambda)$  E OS PARÂMETROS DEFINIDORES DO MOVIMENTO DA PLACA TECTÔNICA  $\bar{\Omega} = \phi, \Lambda, \omega$ . (fonte: DREWES, 1982)

As variações em distância entre estações situadas em placas distintas, refletem as rotações relativas das placas litosféricas. Com este propósito considera-se um vetor de rotação relativo entre as duas placas,  $\bar{\Omega} = \bar{\Omega}_k - \bar{\Omega}_j$  e uma placa é mantida fixa com relação a outra. A equação de observação que expressa a variação em distância ( $\Delta s$ ), em um determinado intervalo de tempo  $\Delta t$ , entre um ponto  $P_0(\phi_0, \lambda_0)$  localizado em uma placa fixa e  $P_1(\phi_1, \lambda_1)$  e outro ponto localizado em uma placa em movimento, cujos parâmetros são  $\bar{\Omega}(\phi, \Lambda, \omega)$  (FIGURA 21), é dada por:

$$\Delta s = ds/dt = \frac{\omega r}{\sin s} (\sin \phi \cos \phi_0 \cos \phi_1 \sin(\lambda_1 - \lambda_0) + \cos \phi \cos \phi_0 \sin \phi_1 \sin(\lambda_0 - \Lambda) - \cos \phi \sin \phi_0 \cos \phi_1 \sin(\lambda_1 - \Lambda)) \quad (90)$$

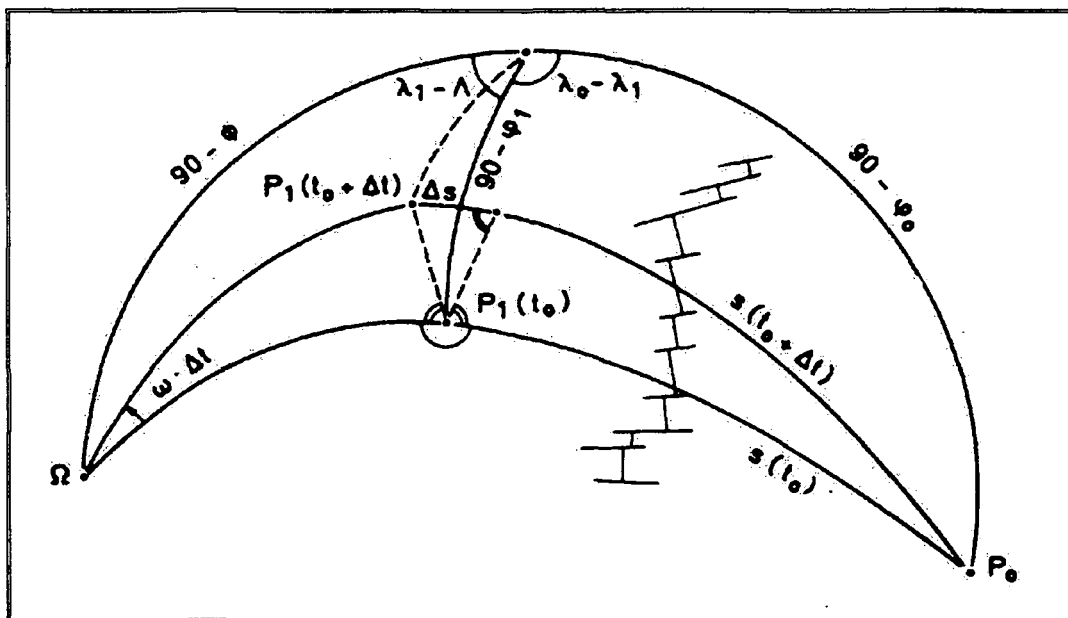


FIGURA 21 - RELAÇÕES GEOMÉTRICAS DO MOVIMENTO  $\Delta s$  ENTRE DUAS PLACAS LITOSFÉRICAS. (fonte: DREWES, 1982).

Para a estimativa dos três parâmetros de rotação ( $\phi, \Lambda, \omega$ ) em cada placa, são necessárias observações de  $\Delta\phi$ ,  $\Delta\lambda$  ou  $\Delta s$ , em pelo menos duas estações observadas por placa. No caso de observações redundantes, realiza-se um ajustamento por mínimos quadrados. O referencial cinemático é realizado fixando-se os parâmetros de rotação de uma placa ( $\bar{\Omega} = const.$ ) ou introduzindo pelo menos três deslocamentos de coordenadas ( $\Delta\phi$  e/ou  $\Delta\lambda$ ). Neste caso, o referencial é mesmo das coordenadas das estações usadas no ajustamento.

O programa PLAMO3D desenvolvido no DGFI, calcula as componentes do vetor velocidade a partir dos parâmetros de rotação de cada placa, segundo os modelos APKIM8.8 e NNR – NUVEL– 1A. Este programa foi usado para estimar as velocidades de todas as estações envolvidas no processamento GPS. Estas informações são utilizadas posteriormente na comparação com os resultados do processamento GPS e os obtidos através do ITRF96 e RNNAC SIR (vide TABELA 38).

### 5.3 COLETA E PREPARO DOS DADOS GPS PARA O PROCESSAMENTO

Os arquivos de dados GPS referentes as estações da RBMC foram fornecidos pelo IBGE através do Departamento de Geodésia, enquanto os arquivos pertencentes as estações IGS, bem como as efemérides precisas foram transferidos via ftp - CDDIS. Os dados de cada estação estão organizados em períodos de 24 horas e em formato RINEX<sup>4</sup> a um intervalo de registro de 30 segundos no caso de estações IGS e 15 segundos no caso de estações RBMC. Ao todo foram utilizadas 19 estações, sendo 9 pertencentes a RBMC e 10 pertencentes a rede IGS (as estações Brasília e Fortaleza, pertencem a ambas redes), conforme pode ser visto na FIGURA 22, todas as estações envolvidas neste processamento estão aparelhadas com receptores geodésicos capazes de coletar dados em código e fase segundo as duas portadoras e conectados a antenas *choke ring* para redução do efeito de multi-caminhamento<sup>5</sup> na recepção do sinais. Inicialmente, foi planejado o processamento de 60 dias referentes a 4 períodos de 15 dias entre os anos de 1997 e 1998. No total, foram processados 75 dias, sendo adicionados quinze dias referentes ao ano de 1999. Nas tabelas 21, 22 e 23 são apresentados os dados GPS coletados para a realização deste trabalho. Ao todo são 1200 arquivos RINEX e 75 arquivos de efemérides, correspondendo a um total de aproximadamente a 3 Gbytes.

---

<sup>4</sup> Formato padrão para armazenamento dos dados GPS.

<sup>5</sup> O efeito de multi-caminhamento é decorrente da presença de objetos com superfícies refletoras próxima a estação GPS, ocasionando uma dispersão dos sinais recebidos.

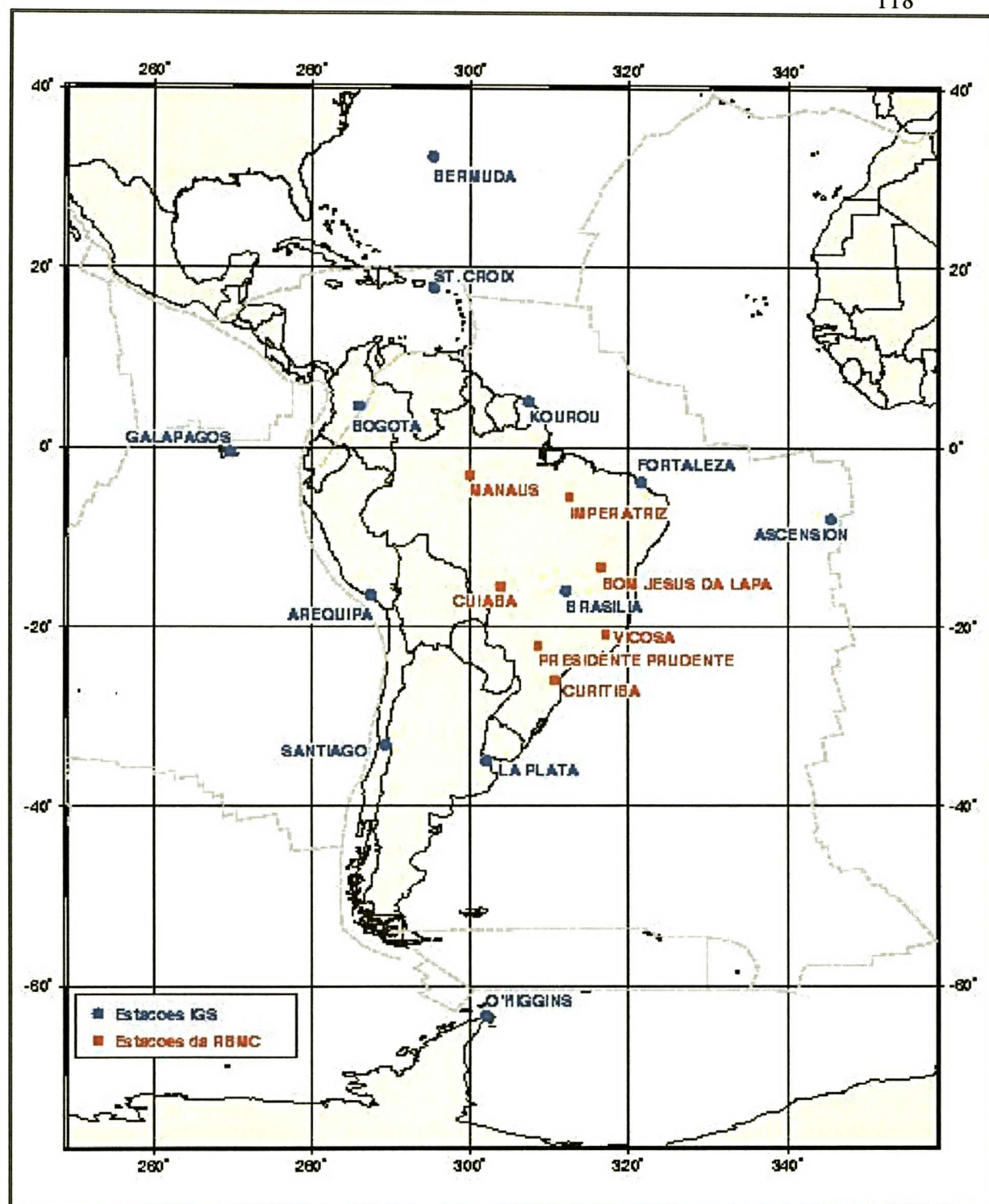


FIGURA 22 - LOCALIZAÇÃO DAS ESTAÇÕES UTILIZADAS NO PROCESSAMENTO GPS.



[illegible]





TABELA 23 - RESUMO DOS DADOS COLETADOS PARA O ANO DE 1999.

(quadrados em branco caracterizam a ausência de observações)

É P O C A	dia do ano																			
		AREQ	ASCI	BOGT	BOMJ	BRAZ	BRMU	CROI	CUIB	FORT	GALA	IMPZ	MANA	KOUR	LPGS	OHIG	PARA	SANT	UEPP	VICO
1 9 9 9, 2	052																			
	053																			
	054																			
	055																			
	056																			
	057																			
	058																			
	059																			
	060																			
	061																			
	062																			
	063																			
	064																			
	065																			
	066																			

Algumas informações foram verificadas nos arquivos RINEX antes do processamento, tais como, identificação das estações e altura da antena. A cada estação foi atribuída uma única identificação composta por quatro campos. Este cuidado é importante na etapa de combinação de soluções. Se uma segunda identificação for adotada para a mesma estação, ao invés de 19, serão combinadas 20 estações. Da mesma forma, a nomenclatura a ser seguida pelos arquivos de cada estação terá nos quatro primeiros campos a mesma identificação da estação no processamento e os quatro últimos campos são referentes a identificação da sessão. Não foram aplicadas correções de excentricidade porque as observações de todas estações são feitas no próprio marco de referência.

O arquivo sumário (extensão “SUM”) localizado no diretório dos dados das estações, foi utilizado para a conferência da altura da antena nos arquivos RINEX, isso para que antes de ser iniciado o processamento seja verificado se todas alturas de antenas se referem ao zero de referência de cada tipo. Essa preocupação é importante porque cada antena possui uma posição do centro de fase e o software Bernese aplica a correção de centro de fase para reduzir as coordenadas obtidas no centro de fase ao marco da estação. Essa correção é aplicada por intermédio das informações constantes no arquivo IGS\_PHAS e obtidas através do IGS. Outra

informação contida no arquivo RINEX e consultada no arquivo IGS\_PHAS é a combinação do tipo de antena/receptor utilizada em cada estação. Para as estações da RBMC estas informações foram obtidas no IBGE. A TABELA 24 contém a identificação das estações e os valores utilizados para a altura da antena em cada estação nas diversas épocas processadas. Um exemplo do arquivo IGS\_PHAS utilizado neste processamento é apresentado na TABELA 25; e na TABELA 26 estão identificadas as diversas combinações receptor/antena utilizadas em cada estação. Nesta tabela verifica-se que o conjunto receptor/antena pode variar de época para época, bem como a altura da antena (vide TABELA 24).

TABELA 24 - ESTAÇÕES QUE COMPÕEM A REDE PROCESSADA, IDENTIFICAÇÃO NO PROCESSAMENTO E ALTURA DA ANTENA NAS DIFERENTES ÉPOCAS (1997,3 / 1997,9 / 1998,3 / 1998,9 / 1999,2).

Estação	País	Identif.	1997,3	1997,9	1998,3	1998,9	1999,2
Arequipa	Peru	AREQ	0,061	0,061	0,061	0,061	
Ascensão	UK	ASC1	0,068	0,068	0,068	0,068	0,068
Bogotá	Colômbia	BOGT	0,061		0,061	0,061	0,061
Bom Jesus	Brasil	BOMJ	0,008	0,008	0,008	0,008	0,008
Brasília	Brasil	BRAZ	0,007	0,007	0,008	0,008	0,008
Bermudas	EUA	BRMU	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
Saint Croix	EUA	CRO1	0,080	0,080	0,080	0,080	0,080
Cuiabá	Brasil	CUIB		0,008	0,008	0,008	0,008
Fortaleza	Brasil	FORT	0,643	0,643	0,643	0,643	0,643
Galápagos	Equador	GALA	0,081	0,081	0,081	0,081	
Imperatriz	Brasil	IMPZ			0,007	0,007	0,007
Manaus	Brasil	MANA	0,008	0,008	0,008	0,008	0,008
Kourou	Guiana Fran.	KOUR	0,132	0,045	0,045	0,045	0,045
La Plata	Argentina	LPGS		0,046	0,046	0,046	0,046
O'Higgins	Chile	OHIG	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001
Curitiba	Brasil	PARA	0,155	0,155	0,155	0,155	0,155
Santiago	Chile	SANT	0,061	0,061	0,061	0,061	0,061
Pres.Prudente	Brasil	UEPP	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
Viçosa	Brasil	VICO		0,007	0,007	0,007	0,007

TABELA 25 - VARIAÇÕES DO CENTRO DE FASE (COMPONENTES, NORTE, LESTE E ALTURA) DAS ANTENAS QUE PARTICIPARAM DO PROCESSAMENTO.

RECEPTOR ANTENA	FREQ L*	VARIAÇÃO DO CENTRO DE FASE (m)		
		NORTE	LESTE	ALTURA
ROGUE SNR-8C	1	0,0	0,0	0,0780
DORNE MARGOLIN B	2	0,0	0,0	0,0960
ROGUE SNR-8000	1	0,0	0,0	0,110
DORNE MARGOLIN T	2	0,0	0,0	0,128
ROGUE SNR-8100	1	0,0	0,0	0,110
DORNE MARGOLIN T	2	0,0	0,0	0,128
ROGUE SNR-12 RM	1	0,0	0,0	0,110
DORNE MARGOLIN T	2	0,0	0,0	0,128
TRIMBLE 4000SSI	1	0,0	0,0	0,110
DORNE MARGOLIN T	2	0,0	0,0	0,128
Obs: (1) Não foi considerada a variação em função do ângulo de elevação.				
(2) Os valores foram obtidos a partir do zero de referência da antena.				

TABELA 26 - COMBINAÇÃO ANTENA RECEPTOR DE CADA ESTAÇÃO NAS DIFERENTES ÉPOCAS (1997,3 / 1997,9 / 1998,3 / 1998,9 / 1999,2).

	1997.3		1997.9		1998.3		1998.9		1999.2	
AREQ	Rogue SNR-8000	Dorne Mar.T	Rogue SNR-8000	Dorne Mar.T	Rogue SNR-8000	Dorne Mar.T	Rogue SNR-8000	Dorne Mar.T		
ASCI	Rogue SNR-8000	Dorne Mar.T	Rogue SNR-8000	Dorne Mar.T	Rogue SNR-8000	Dorne Mar.T	Rogue SNR-8000	Dorne Mar.T	Rogue SNR-8000	Dorne Mar.T
BOGT	Rogue SNR-8000	Dorne Mar.T			Rogue SNR-8000	Dorne Mar.T	Rogue SNR-8000	Dorne Mar.T	Rogue SNR-8000	Dorne Mar.T
BOMJ	Trimble 4000SSI	Dorne Mar.T	Trimble 4000SSI	Dorne Mar.T	Trimble 4000SSI	Dorne Mar.T	Trimble 4000SSI	Dorne Mar.T		Dorne Mar.T
BRAZ	Rogue SNR-8000	Dorne Mar.T	Rogue SNR-8000	Dorne Mar.T	Trimble 4000SSI	Dorne Mar.T	Trimble 4000SSI	Dorne Mar.T	Trimble 4000SSI	Dorne Mar.T
BRMU	Rogue SNR-8000	Dorne Mar.T	Rogue SNR-8000	Dorne Mar.T	Rogue SNR-8000	Dorne Mar.T	Rogue SNR-8000	Dorne Mar.T	Rogue SNR-8000	Dorne Mar.T
CRO1	Rogue SNR-8000	Dorne Mar.T	Rogue SNR-8000	Dorne Mar.T	Rogue SNR-8000	Dorne Mar.T	Rogue SNR-8000	Dorne Mar.T	Rogue SNR-8000	Dorne Mar.T
CUIB			Trimble 4000SSI	Dorne Mar.T	Trimble 4000SSI	Dorne Mar.T	Trimble 4000SSI	Dorne Mar.T	Trimble 4000SSI	Dorne Mar.T
FORT	Rogue SNR-8000	Dorne Mar.T	Rogue SNR-8000	Dorne Mar.T	Rogue SNR-8000	Dorne Mar.T	Rogue SNR-8000	Dorne Mar.T	Rogue SNR-8000	Dorne Mar.T
GALA	Rogue SNR-8000	Dorne Mar.T	Rogue SNR-8000	Dorne Mar.T	Rogue SNR-8000	Dorne Mar.T	Rogue SNR-8000	Dorne Mar.T		
IMPZ					Trimble 4000SSI	Dorne Mar.T	Trimble 4000SSI	Dorne Mar.T	Trimble 4000SSI	Dorne Mar.T
MANA	Trimble 4000SSI	Dorne Mar.T	Trimble 4000SSI	Dorne Mar.T	Trimble 4000SSI	Dorne Mar.T	Trimble 4000SSI	Dorne Mar.T	Trimble 4000SSI	Dorne Mar.T
KOUR	Rogue SNR-8C	Dorne Mar.B	Rogue SNR-8100	Dorne Mar.B	Rogue SNR-8100	Dorne Mar.T	Rogue SNR-8100	Dorne Mar.T	Rogue SNR-8100	Dorne Mar.T
LPGS			Rogue SNR-8000	Dorne Mar.T	Rogue SNR-8000	Dorne Mar.T	Rogue SNR-8000	Dorne Mar.T	Rogue SNR-8000	Dorne Mar.T
OHIG	Rogue SNR-8000	Dorne Mar.T	Rogue SNR-8000	Dorne Mar.T	Rogue SNR-8000	Dorne Mar.T	Rogue SNR-8000	Dorne Mar.T	Rogue SNR-8000	Dorne Mar.T
PARA	Trimble 4000SSI	Dorne Mar.T	Trimble 4000SSI	Dorne Mar.T	Trimble 4000SSI	Dorne Mar.T	Trimble 4000SSI	Dorne Mar.T	Trimble 4000SSI	Dorne Mar.T
SANT	Rogue SNR-12RM	Dorne Mar.T	Rogue SNR-12RM	Dorne Mar.T	Rogue SNR-12RM	Dorne Mar.T	Rogue SNR-8000	Dorne Mar.T	Rogue SNR-8000	Dorne Mar.T

UEPP	Trimble 4000SSI	Dorne Mar.T	Trimble 4000SSI	Dorne Mar.T	Trimble 4000SSI	Dorne Mar.T	Trimble 4000SSI	Dorne Mar.T	Trimble 4000SSI	Dorne Mar.T
VICO			Trimble 4000SSI	Dorne Mar.T	Trimble 4000SSI	Dorne Mar.T	Trimble 4000SSI	Dorne Mar.T	Trimble 4000SSI	Dorne Mar.T

#### 5.4 ESTRATÉGIAS PARA O PROCESSAMENTO DOS DADOS GPS NO SOFTWARE BERNESE

Inicialmente foram selecionadas 7 estações IGS nas quais o processamento diário foi injuncionado. São elas: Arequipa, Ascensão, Santiago , Saint Croix, La Plata, Bogotá e Kourou. Através das coordenadas e velocidades (vide TABELA 27) fornecidas pela realização ITRF96 (1997,0) a coordenada de cada estação foi reduzida ao dia médio de cada época processada. O programa utilizado na redução das coordenadas foi o TRNOBS, desenvolvido no Geodetic Survey of Canada por Mike Craymer. A versão original deste programa transforma coordenadas e linhas de base no sistema NAD83 em várias versões do ITRFyy, considerando também a redução temporal através das velocidades obtidas no modelo global de movimento de placas NNR-NUVEL-1A. Este programa trabalha com parâmetros de transformação entre as versões ITRFyy divulgados no Technical Notes 21. Algumas adaptações foram feitas, no sentido de adicionar constantes referidas a placa sul-americana. O programa ITRFEPOC, desenvolvido no DGFI, foi utilizado para a verificação dos resultados obtidos no TRNOBS. Na conclusão desta etapa foram gerados 5 conjuntos de coordenadas referentes as épocas a serem processadas. Estes valores são encontrados na TABELA 28.

TABELA 27 - COORDENADAS DAS ESTAÇÕES DE REFERÊNCIA EM ITRF96, ÉPOCA 1997,0 E OS CORRESPONDENTES DESVIOS PADRÃO E VELOCIDADES.

COORDENADAS IRTF96 época 1997,0						
ESTAÇÃO	X/ $\sigma_x$ (m)	Y/ $\sigma_y$ (m)	Z/ $\sigma_z$ (m)	Vx (m/ano)	Vy(m/ano)	Vz (m/ano)
KOUR	3839591,4280 0,005	-5059567,5400 0,006	579956,9240 0,003	-,0010	,0001	,0114
LPGS	2780102,9740 0,004	-4437418,8600 0,004	-3629404,5970 0,004	,0034	-,0061	,0080
AREQ	1942826,7310 0,003	-5804070,2460 0,004	-1796893,9770 0,003	,0114	,0013	,0123
ASC1	6118526,0860 0,004	-1572344,6900 0,004	-876451,1820 0,003	,0032	-,0002	,0072
BOGT	1744399,1130 0,004	-6116037,8180 0,005	512731,6230 0,003	,0076	,0034	,0161
CRO1	2607771,1930 0,003	-5488076,8300 0,004	1932767,6980 0,003	,0079	,0085	,0145

SANT	1769693,3390	-5044574,1460	-3468321,0620	,0219	-,0074	,0070
	0,004	0,004	0,003			

TABELA 28 - COORDENADAS DAS ESTAÇÕES DE REFERÊNCIA REDUZIDAS  
PARA CADA ÉPOCA DO PROCESSAMENTO GPS.

COORDENADAS A PRIORI 1997,3 (IRTF96)			
ESTAÇÃO	X (m)	Y (m)	Z (m)
KOUR	3839591,4276	-5059567,5399	579956,9281
LPGS	2780102,9752	-4437418,8622	-3629404,5942
AREQ	1942826,7351	-5804070,2455	-1796893,9726
ASC1	6118526,0871	-1572344,6901	-876451,1794
BOGT	1744399,1157	-6116037,8168	512731,6287
CRO1	2607771,1958	-5488076,8270	1932767,7032
SANT	1769693,3468	-5044574,1486	-3468321,0595
COORDENADAS A PRIORI 1997,9 (IRTF96)			
ESTAÇÃO	X (m)	Y (m)	Z (m)
KOUR	3839591,4271	-5059567,5399	579956,9339
LPGS	2780102,9769	-4437418,8653	-3629404,5901
AREQ	1942826,7409	-5804070,2449	-1796893,9663
ASC1	6118526,0888	-1572344,6902	-876451,1758
BOGT	1744399,1195	-6116037,8150	512731,6369
CRO1	2607771,1998	-5488076,8226	1932767,7105
SANT	1769693,3579	-5044574,1524	-3468321,0559
COORDENADAS A PRIORI 1998,3 (IRTF96)			
ESTAÇÃO	X (m)	Y (m)	Z (m)
KOUR	3839591,4266	-5059567,5399	579956,9395
LPGS	2780102,9786	-4437418,8683	-3629404,5861
AREQ	1942826,7465	-5804070,2442	-1796893,9603
ASC1	6118526,0904	-1572344,6903	-876451,1722
BOGT	1744399,1233	-6116037,8134	512731,6449
CRO1	2607771,2038	-5488076,8184	1932767,7177
SANT	1769693,3688	-5044574,1561	-3468321,0525
COORDENADAS A PRIORI 1998,9 (IRTF96)			
ESTAÇÃO	X (m)	Y (m)	Z (m)
KOUR	3839591,4261	-5059567,5398	579956,9455
LPGS	2780102,9804	-4437418,8715	-3629404,5819
AREQ	1942826,7525	-5804070,2435	-1796893,9538
ASC1	6118526,0920	-1572344,6904	-876451,1684
BOGT	1744399,1274	-6116037,8116	512731,6534
CRO1	2607771,2079	-5488076,8139	1932767,7254
SANT	1769693,3804	-5044574,1599	-3468321,0488
COORDENADAS A PRIORI 1999,2 (IRTF96)			
ESTAÇÃO	X (m)	Y (m)	Z (m)
KOUR	3839591,4258	-5059567,5398	579956,9487
LPGS	2780102,9814	-4437418,8732	-3629404,5797
AREQ	1942826,7557	-5804070,2432	-1796893,9504
ASC1	6118526,0929	-1572344,6904	-876451,1664
BOGT	1744399,1294	-6116037,8106	512731,6578
CRO1	2607771,2101	-5488076,8116	1932767,7294
SANT	1769693,3864	-5044574,1620	-3468321,0469

O software Bernese é formado por um conjunto de programas que desempenham tarefas distintas dentro de um processamento de dados GPS, que por sua vez devem seguir uma determinada sequência. Os principais programas e suas atribuições em um processamento são:

CODSPP: processamento dos sinais de código para estimativa do erro do relógio dos satélites;

SNDIFF: montagem das linhas de base;

MAUPRP: processamento dos sinais de fase para eliminação das perdas de ciclos;

GPSEST: estimativa dos parâmetros, que neste caso são as coordenadas das estações envolvidas no processamento, os parâmetros troposféricos locais<sup>6</sup> e ambigüidades<sup>7</sup>.

Os processamentos diários das 19 estações foram realizados utilizando-se efemérides precisas IGS e seus respectivos ERP. Inicialmente, os arquivos em formato RINEX são convertidos no formato do Bernese através do programa RXOBV3. Na sequência do processamento, os erros dos relógios são eliminados no programa CODSPP através das observações de código.

Considerando que a técnica de levantamento é o posicionamento relativo estático, o Bernese monta inicialmente as observações de simples diferença de fase (linhas de base). Portanto, antes de se dar início ao processamento, é necessário que as linhas de base sejam formadas entre as estações envolvidas em um processamento de sessão. O processamento de sessão é caracterizado pelo processamento simultâneo de dados de 24 horas (neste caso particular) de todas as estações em operação.

---

<sup>6</sup> Os erros causados pelo atraso na propagação dos sinais GPS na troposfera podem ser tratados através de duas modelagens dependendo de suas magnitudes. Nos modelos *a priori* a refração troposférica é corrigida somente através de observações meteorológicas. O atraso troposférico também depende da distância viajada pelas ondas de rádio e é entretanto uma função da distância zenital do satélite. Os modelos de atraso troposférico no zênite utilizam dados GPS para a estimativa de seus parâmetros. Para enfatizar esta dependência da elevação, o atraso troposférico é escrito como o produto do atraso na direção do zênite denominada de função de mapeamento.

<sup>7</sup> É o número de ciclos entre o satélite e o receptor, referente à primeira medida. Incógnita nas equações de observação GPS.



Ainda no pré-processamento a detecção e correção das perdas de ciclos foi realizada em soluções de tripla diferença de fase no modo sessão, na combinação linear de L1/L2 livre do efeito ionosférico<sup>8</sup>, denominada no software de L3.

Na etapa da estimativa dos parâmetros (o processamento propriamente dito), os dados de dupla diferença de fase foram modelados na observável L3, com ângulo de elevação maior que 10° e 30'' de intervalo de rastreamento. As correções dos atrasos troposféricos no zênite em cada estação (com a função de mapeamento Neill) foram estimados a cada 2 horas, ou seja, para uma sessão de 24 horas foram estimados 12 correções. O modelo *a priori* da troposfera foi o Saastamoinen e as correções ao modelo foram injuncionadas a 1,0 metro (absoluta) e 0,05 (relativa). As ambigüidades foram resolvidas (fixadas) separadamente para cada linha de base, devido a limitações do programa, sendo aplicada a estratégia a QIF (Quasi Ionosphere Free), a qual utiliza as observáveis L1 e L2.

Na solução final da estimativa dos parâmetros as ambigüidades resolvidas<sup>9</sup> (fixadas) foram usadas na solução, as demais ambigüidades foram pré-eliminadas, ou seja, não entram como incógnitas no sistema de equações. Foi aplicado o processamento de sessão em uma solução injuncionada nas 7 estações IGS escolhidas como referência no processamento.

Resumidamente, as principais opções/estratégias adotadas nos processamentos diários são apresentadas no ANEXO B :

## 5.5 COMBINAÇÃO DAS SOLUÇÕES DIÁRIAS

Conforme foi definido nas estratégias do processamento, as soluções diárias foram processadas como rede injuncionada em 7 estações IGS, segundo suas precisões na realização oficial do ITRF96 (1997,0). Os valores de coordenadas adotados para as injunções das soluções diárias, são mostrados na TABELA 28. A cada solução diária foram gerados dois arquivos, um contendo as coordenadas finais do processamento e outro contendo as

---

<sup>8</sup> As diferenças entre equações de observação em fase permitem eliminar ou reduzir alguns erros nas observações GPS, como por exemplo o erro causado pela refração ionosférica.

<sup>9</sup> Resolver ambigüidades significa atribuir o número correto de inteiros ao valor real estimado.

respectivas equações normais. A combinação das soluções é um ajustamento por mínimos quadrados de todas as soluções diárias (através das equações normais), no qual são estimados coordenadas e velocidades para as estações. No contexto de combinação de soluções GPS (ou de qualquer outra técnica observacional), podem ser configurados dois tipos de soluções: rede injuncionada e rede livre<sup>10</sup>. A solução de “rede injuncionada” consiste na ponderação das coordenadas e/ou velocidades *a priori* das estações de referência (estações injuncionadas). Um ajustamento de “rede livre” é realizado através de fracas injunções, permitindo assim, a estimativa de parâmetros de transformação (além das coordenadas e velocidades) entre a solução combinada GPS (sistema interno da solução) e um sistema de referência externo, como por exemplo ITRF96. A solução de rede injuncionada possui dois principais inconvenientes. Primeiro porque fixando ou injuncionando fortemente pelo menos três coordenadas, resultará em um pequeno deslocamento da origem do sistema da solução, com o geocentro, o qual é entretanto, a origem adequada para qualquer sistema de referência terrestre. Segundo porque os erros existentes em alguma estação de referência serão propagados para a solução como um todo [GREGORIUS, 1996].

A combinação de soluções dos sistemas de equações normais, bem como a estimativa das velocidades, foi realizada através do programa ADDNEQ (programa pertencente ao software Bernese). A técnica sequencial de ajustamento aplicada pelo ADDNEQ, independe das observações das soluções diárias e é com este propósito que são armazenadas nas equações normais as coordenadas e a respectiva MVC<sup>11</sup>, gerando assim um sistema de pseudo-observações. Para cada solução diária  $s$ , em cada estação  $i$ , tem-se coordenadas representadas pelo vetor  $X_s^i$  na época  $t_s$  e velocidade  $\dot{X}_s^i$  expressa em um determinado sistema de referência terrestre. A combinação das equações normais consiste em estimar [BOUCHER et al., 1997]:

- (a) Coordenadas  $X_{ITRF}^i$  em uma determinada época  $t_0$  e velocidade  $\dot{X}_{ITRF}^i$  em ITRS.
- (b) Parâmetros de transformação  $T_k$  em uma época  $t_k$  e suas variações  $\dot{T}_k$ , a partir do ITRF a cada sistema individual  $k$ . Somente para o caso de solução de rede livre.

<sup>10</sup> Conhecido na bibliografia inglesa por “non fiducial” ou “free network”.

O modelo usado na combinação é dado pelas equações (16) e (17), particularizado para este exemplo por:

$$X_s^i = X_{ITRF}^i + (t_s^i - t_0) \dot{X}_{ITRF}^i + T_k + s_k X_{ITRF}^i + R_k X_{ITRF}^i + [\dot{T}_k + \dot{s}_k X_{ITRF}^i + \dot{R}_k X_{ITRF}^i](t_s^i - t_k) \quad (91)$$

$$\dot{X}_s^i = \dot{X}_{ITRF}^i + \dot{T}_k + \dot{s}_k X_{ITRF}^i + \dot{R}_k X_{ITRF}^i \quad (92)$$

Para cada solução individual  $k$ ,  $s_k$  é o fator de escala,  $T_k$  é o vetor translação e  $R_k$  é a matriz rotação. As equações normais dada para um sistema de equações de observação ( $s=1,2,\dots,s$ ) assumem a seguinte forma na notação matricial :

$$[A_s^T P_s A_s] X = [A_s^T P_s L_s] \quad (93)$$

$$[A_1^T P_1 A_1 + A_2^T P_2 A_2 + \dots + A_s^T P_s A_s] X = [A_1^T P_1 L_1 + A_2^T P_2 L_2 + \dots + A_s^T P_s L_s] \quad (94)$$

Onde  $X$  é o vetor dos parâmetros que neste caso podem ser 7 ( $t_x, t_y, t_z, \varepsilon_x, \varepsilon_y, \varepsilon_z$  e  $s$ ) ou 14 ( $t_x, t_y, t_z, \varepsilon_x, \varepsilon_y, \varepsilon_z, s, \dot{t}_x, \dot{t}_y, \dot{t}_z, \dot{\varepsilon}_x, \dot{\varepsilon}_y, \dot{\varepsilon}_z$  e  $\dot{s}$ ) parâmetros de transformação, mais as coordenadas e velocidades das estações envolvidas. A matriz peso ( $P$ ) é dada por:  $\Sigma_x^{-1}$ , onde  $\Sigma_x$  é a MVC de cada solução diária. Entretanto, para soluções de “rede livre” (free network), para permitir a realização da transformação de similaridade, a MVC sofre uma alteração através de um processo conhecido por projetor ortogonal. O projetor ortogonal consiste em modificar a MVC original de modo que as covariâncias sejam relativas a um sistema definido internamente, ou seja, atribuir valores pequenos para que a solução seja fracamente injuncionada. Sendo assim, para cada solução individual  $s$ , a matriz MVC projetada ( $\bar{\Sigma}_s$ ) é dada por:

$$\bar{\Sigma}_s = \left( \Sigma_x^{-1} + B^T \Sigma_\theta^{-1} B \right)^{-1} \quad (95)$$

---

<sup>11</sup> Outros parâmetros também podem ser armazenados nas equações normais, tais como: troposfera, órbitas, ERP,

$$B = (A^T \Sigma_x^{-1} A)^{-1} A^T \Sigma_x^{-1} \quad (96)$$

$\Sigma_{\theta=}$  é a MVC dos parâmetros de transformação.

A matriz  $A$  é composta pelas coordenadas de cada solução  $s$ , assumindo a seguinte forma:

$$A = \begin{array}{c|cccccccc} \hline & 1 & 0 & 0 & x_i & 0 & z_i & -y_i & \\ \hline & 0 & 1 & 0 & y_i & -z_i & 0 & x_i & 0 \\ & 0 & 0 & 1 & z_i & y_i & -x_i & 0 & \\ \hline & & & & & & 1 & 0 & 0 & x_i & 0 & z_i & -y_i \\ & & & & & & 0 & 1 & 0 & y_i & -z_i & 0 & x_i \\ & & & & & & 0 & 0 & 1 & z_i & y_i & -x_i & 0 \\ \hline \end{array} \quad (97)$$

A dimensão da matriz  $A$  é dada em função do número de soluções diárias e dos parâmetros de transformação (7 ou 14). Na solução final, foram combinadas todas soluções diárias injuncionando nas 7 estações IGS (estações de referência). Como os sistemas de soluções GPS são muito otimistas, adotou-se pesos (desvios padrão) para estas estações de referência cerca de 10 vezes superior ao usado inicialmente nas soluções diárias, para que não ocorra uma indesejável variação em coordenadas mantendo, desta forma, a solução final em ITRF96. Para as mesmas estações de referência foram adotados valores *a priori* em velocidades, segundo solução ITRF96. Foram atribuídos pesos (desvios padrão) nas velocidades *a priori* somente na componente altimétrica, conforme recomendação do manual do software Bernese<sup>12</sup>. As coordenadas da solução final estão referidas ao ITRF96, época 1998,2. As velocidades são produtos de uma extrapolação de resultados de coordenadas obtidas em distintas épocas, não havendo desta forma uma época de referência para elas. O sistema de referência das velocidades finais é ITRF96 (por serem informações derivadas das

---

nutação, centro de massa e deslocamento do centro de fase da antena.

coordenadas das estações). Apesar da indicação da solução de rede livre ser a mais adequada, optou-se pela solução injuncionada, por questões de limitação da máquina usada para finalizar o processamento no Brasil.

## 5.6 RESULTADOS

### 5.6.1 Consistência das soluções GPS com o ITRF96

Um sistema de referência é especificado através da informação *a priori* das coordenadas e/ou velocidades das estações. Considerando que todas as placas da crosta terrestre estão em movimento, deve-se usar um sistema de referência cinemático [LARSON et al, 1997], ou seja, os parâmetros de transformação deverão estar referidos a uma determinada época. Um sistema de referência é realizado através das coordenadas das estações e respectivas MVC. Parâmetros de transformação (transformação de similaridade – 7 parâmetros) podem ser estimados para transformar uma solução GPS “livre” (não injuncionada) em um sistema de referência específico (ex: ITRF96). A qualidade da transformação dependerá da precisão das coordenadas e velocidades do sistema de referência que será usado para derivar a transformação (valores *a priori*) e na distribuição geográfica de suas estações.

Uma outra forma de integração de soluções GPS ao ITRF<sub>yy</sub> é dada através da utilização de efemérides precisas IGS. As efemérides IGS utilizadas neste trabalho estão em duas materializações distintas do ITRS. Para o ano de 1997 o referencial é ITRF94 e para os anos 1998 e 1999 o referencial é ITRF96. Segundo BOUCHER et al. [1997], a definição do sistema de referência (origem, escala, orientação e evolução no tempo) da combinação de soluções é alcançada de modo que ITRF96 está no mesmo sistema que ITRF94. Sendo assim, decidiu-se adotar coordenadas e velocidades *a priori* para o processamento, referidas ao ITRF96 por ser o de melhor precisão e por possuir coordenadas e velocidades para todas as estações de referência. Com o objetivo de se obter a acurácia da solução combinada de cada uma das cinco épocas com relação ao ITRF96, foram realizadas transformações de similaridade (ou

---

<sup>12</sup> Consta no manual que para serem estimadas a velocidade na componente altimétrica, é necessário um período

Helmert). Os resultados das transformações (parâmetros e resíduos) podem ser vistos nas Tabelas 29, 30, 31, 32 e 33 revelando a acurácia dos resultados com relação ao ITRF96. O maior desvio padrão da transformação foi de 14,7 mm na época 1998,3. Como era esperado, os resíduos são maiores na componente vertical, mas em nenhum dos casos passou de 2 cm .

TABELA 29 - TRANSFORMAÇÃO DE HELMERT – 7 PARÂMETROS, ENTRE A SOLUÇÃO COMBINADA NA ÉPOCA 1997,3 COM ITRF96 .

TRANSFORMAÇÃO DE HELMERT – SISTEMA CARTESIANO (X, Y, Z)			
COORDENADAS ITRF96 – ÉPOCA 1997,3 X RESULTADOS FINAIS DA ÉPOCA 1997,3			
NÚMERO DE PARÂMETROS : 7			
NÚMERO DE COORDENADAS : 18			
DESVIO PADRÃO DA TRANSFORMAÇÃO : 12,0 mm			
PARÂMETROS:			
TRANSLAÇÃO EM X : -19,1 +- 13,2 mm			
TRANSLAÇÃO EM Y : 1,5 +- 12,0 mm			
TRANSLAÇÃO EM Z : 13,7 +- 15,9 mm			
ROTAÇÃO EM X : - 0 0 0,0002+- 0,0005"			
ROTAÇÃO EM Y : - 0 0 0,0005+- 0,0005"			
ROTAÇÃO EM Z : - 0 0 0,0004+- 0,0005"			
ESCALA : 0,004 +- 0,002 mm/km			
ESTAÇÃO	RESÍDUOS EM MILÍMETROS – COMP. NO SISTEMA LOCAL		
	NORTE	LESTE	VERTICAL
KOUR	4,8	-1,9	-29,8
AREQ	-3,6	-1,3	-6,8
ASC1	-4,3	-7,6	5,2
BOGT	3,5	5,8	10,0
CRO1	1,8	-0,1	16,5
SANT	-4,6	6,0	4,9
$\sigma$ por componente	4,2	5,2	16,5

TABELA 30 - TRANSFORMAÇÃO DE HELMERT – 7 PARÂMETROS, ENTRE A SOLUÇÃO COMBINADA NA ÉPOCA 1997,9 COM ITRF96 .

TRANSFORMAÇÃO DE HELMERT – SISTEMA CARTESIANO (X, Y, Z)			
COORDENADAS ITRF96 – ÉPOCA 1997,9 X RESULTADOS FINAIS DA ÉPOCA 1997,9			
NÚMERO DE PARÂMETROS : 7			
NÚMERO DE COORDENADAS : 18			
DESVIO PADRÃO DA TRANSFORMAÇÃO : 7,8 mm			
PARÂMETROS:			
TRANSLAÇÃO EM X : -11,6 +- 8,8 mm			
TRANSLAÇÃO EM Y : -1,4 +- 8,1 mm			
TRANSLAÇÃO EM Z : 11,9 +- 9,2 mm			
ROTAÇÃO EM X : - 0 0 0,0003+- 0,0003"			
ROTAÇÃO EM Y : - 0 0 0,0004+- 0,0003"			
ROTAÇÃO EM Z : - 0 0 0,0004+- 0,0003"			

longo de dados GPS.

ESCALA	:	0,002 +- 0,001 mm/km		
ESTAÇÃO		RESÍDUOS EM MILÍMETROS - COMP. NO SISTEMA LOCAL		
		NORTE	LESTE	VERTICAL
KOUR		-1,2	-0,8	-5,4
LPGS		4,3	1,9	1,3
AREQ		1,2	-3,1	-15,9
ASC1		-5,5	-1,5	-2,1
CRO1		2,8	-1,2	12,9
SANT		-4,0	5,8	9,1
$\sigma$ por componente		3,9	3,2	10,4

TABELA 31 - TRANSFORMAÇÃO DE HELMERT – 7 PARÂMETROS, ENTRE A SOLUÇÃO COMBINADA NA ÉPOCA 1998,3 COM ITRF96 .

TRANSFORMAÇÃO DE HELMERT - SISTEMA CARTESIANO (X, Y, Z)				
COORDENADAS ITRF96 - ÉPOCA 1998,3 X RESULTADOS FINAIS DA ÉPOCA 1998,3				
NÚMERO DE PARÂMETROS : 7				
NÚMERO DE COORDENADAS : 21				
DESVIO PADRÃO DA TRANSFORMAÇÃO : 14,7 mm				
PARÂMETROS:				
TRANSLAÇÃO EM X : -22,4 +- 15,8 mm				
TRANSLAÇÃO EM Y : 11,4 +- 14,0 mm				
TRANSLAÇÃO EM Z : 12,0 +- 16,5 mm				
ROTAÇÃO EM X : - 0 0 0,0003+- 0,0005"				
ROTAÇÃO EM Y : - 0 0 0,0004+- 0,0005"				
ROTAÇÃO EM Z : - 0 0 0,0007+- 0,0006"				
ESCALA	:	0,006 +- 0,002 mm/km		
ESTAÇÃO		RESÍDUOS EM MILÍMETROS - COMP. NO SISTEMA LOCAL		
		NORTE	LESTE	VERTICAL
KOUR		0,1	-2,3	-28,1
LPGS		2,8	2,4	-2,7
AREQ		-6,6	-6,4	-25,9
ASC1		-6,8	-9,4	3,1
BOGT		10,3	7,5	19,7
CRO1		3,4	-1,5	16,3
SANT		-6,7	11,6	17,6
$\sigma$ por componente		6,6	7,5	20,2

TABELA 32 - TRANSFORMAÇÃO DE HELMERT – 7 PARÂMETROS, ENTRE A SOLUÇÃO COMBINADA NA ÉPOCA 1998,9 COM ITRF96 .

TRANSFORMAÇÃO DE HELMERT - SISTEMA CARTESIANO (X, Y, Z)				
COORDENADAS ITRF96 - ÉPOCA 1998,9 X RESULTADOS FINAIS DA ÉPOCA 1998,9				
NÚMERO DE PARÂMETROS : 7				
NÚMERO DE COORDENADAS : 21				
DESVIO PADRÃO DA TRANSFORMAÇÃO : 12,3 mm				
PARÂMETROS:				
TRANSLAÇÃO EM X : -10,2 +- 13,3 mm				
TRANSLAÇÃO EM Y : 0,9 +- 11,7 mm				
TRANSLAÇÃO EM Z : 24,6 +- 13,8 mm				
ROTAÇÃO EM X : - 0 0 0,0007+- 0,0004"				
ROTAÇÃO EM Y : - 0 0 0,0004+- 0,0004"				

ROTAÇÃO EM Z	:	- 0 0	0,0004+-	0,0005"
ESCALA	:		0,003 +-	0,002 mm/km
ESTAÇÃO		RESÍDUOS EM MILÍMETROS - COMP. NO SISTEMA LOCAL		
		NORTE	LESTE	VERTICAL
KOUR		-0,7	-5,1	-25,6
LPGS		1,8	-7,5	-2,6
AREQ		-3,7	1,1	-10,0
ASC1		-7,9	-8,2	3,1
BOGT		10,6	0,3	15,6
CRO1		5,5	1,3	13,8
SANT		-10,9	19,9	5,7
$\sigma$ por componente		7,5	9,5	14,4

TABELA 33 - TRANSFORMAÇÃO DE HELMERT – 7 PARÂMETROS, ENTRE A SOLUÇÃO COMBINADA NA ÉPOCA 1999,2 COM ITRF96 .

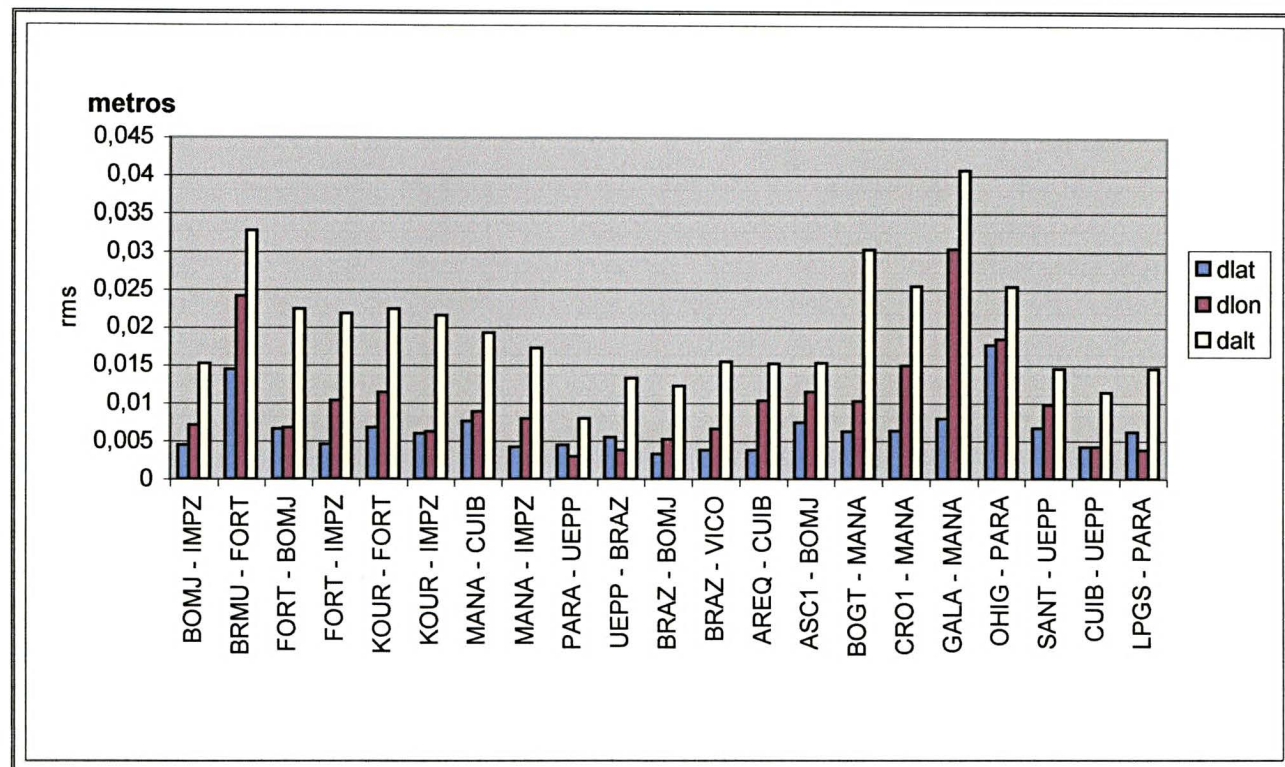
TRANSFORMAÇÃO DE HELMERT - SISTEMA CARTESIANO (X, Y, Z)				
COORDENADAS ITRF96 - ÉPOCA 1999,2 X RESULTADOS FINAIS DA ÉPOCA 1999,2				
NÚMERO DE PARÂMETROS	:	7		
NÚMERO DE COORDENADAS	:	18		
DESVIO PADRÃO DA TRANSFORMAÇÃO	:	13,2 mm		
PARÂMETROS:				
TRANSLAÇÃO EM X	:	-30,6	+- 14,6	mm
TRANSLAÇÃO EM Y	:	6,0	+- 13,0	mm
TRANSLAÇÃO EM Z	:	-4,5	+- 15,0	mm
ROTAÇÃO EM X	:	0 0	0,0001+-	0,0005"
ROTAÇÃO EM Y	:	- 0 0	0,0002+-	0,0005"
ROTAÇÃO EM Z	:	- 0 0	0,0007+-	0,0005"
ESCALA	:		0,005 +-	0,002 mm/km
ESTAÇÃO		RESÍDUOS EM MILÍMETROS - COMP. NO SISTEMA LOCAL		
		NORTE	LESTE	VERTICAL
KOUR		-6,1	-12,1	-7,8
LPGS		-1,3	-8,4	-9,9
ASC1		-6,4	-3,5	-2,4
BOGT		12,0	0,8	-11,4
CRO1		6,7	2,8	18,5
SANT		-9,1	22,6	13,1
$\sigma$ por componente		8,4	12,2	12,7

### 5.6.2 Avaliação dos resultados

Após a combinação das soluções em diferentes épocas foi feita uma análise dos resultados e principalmente no que se refere ao comportamento das linhas de base. Com o objetivo de se fornecer uma análise geral quanto ao comportamento de algumas linhas de base processadas, foi efetuada uma combinação das soluções dos 75 dias processados. O GRÁFICO 5 apresenta o desvio padrão em cada linha de base segundo as componentes latitude, longitude e altura após a combinação de todas soluções diárias.



GRÁFICO 5 - DESVIOS PADRÃO DAS LINHAS DE BASE PROCESSADAS SEGUNDO LATITUDE, LONGITUDE E ALTURA.



Na TABELA 34 são fornecidos os desvios padrão de peso unitário das coordenadas, derivados da comparação entre as coordenadas diárias de cada estação com as coordenadas da solução combinada. Estes números representam a precisão diária das coordenadas. Na TABELA 35 estão as coordenadas da solução final e seus respectivos desvios padrão e na TABELA 36 estão as velocidades finais e seus respectivos desvios padrão.

TABELA 34 - DESVIO PADRÃO UNITÁRIO DAS COORDENADAS.

ESTAÇÃO	Nº de SOLUÇÕES	N (mm)	E (mm)	ALT (mm)
BOMJ	61	10,9	10,3	12,8
BRMU	64	16,4	28,0	28,6
FORT	74	11,6	11,9	20,0
KOUR	73	11,5	11,2	20,1
MANA	70	11,4	10,3	25,7
PARA	74	11,7	10,1	12,9
UEPP	70	10,5	9,3	11,2
BRAZ	72	10,3	9,3	15,3
AREQ	47	9,3	8,9	7,6
ASC1	67	8,3	9,8	9,8
BOGT	56	10,7	11,4	20,0
CRO1	72	10,7	13,0	10,8
GALA	57	11,1	31,3	43,2



GALA	57	11,1	31,3	43,2
OHIG	59	14,7	22,1	18,8
SANT	72	11,8	9,3	11,8
VICO	56	10,3	12,8	12,5
CUIB	59	10,2	9,0	14,4
LPGS	58	9,9	11,2	7,7
IMPZ	32	9,4	11,7	16,1
$\sigma$ A POSTERIORI DA SIMPLES DIFERENÇA DE FASE: 0,0049				
$\sigma$ A POSTERIORI DA COMPARAÇÃO DAS COORDENADAS : 0,0547				

TABELA 35 - COORDENADAS E RESPECTIVOS DESVIOS PADRÃO.

ESTAÇÃO	X (m)	$\sigma_x$ (m)	Y (m)	$\sigma_y$ (m)	Z (m)	$\sigma_z$ (m)
AREQ	1942826,7419	0,0001	-5804070,2459	0,0002	-1796893,9706	0,0001
UEPP	3687624,3164	0,0001	-4620818,5796	0,0002	-2386880,3869	0,0001
ASC1	6118526,0765	0,0003	-1572344,6936	0,0002	-876451,1685	0,0001
BOMJ	4510195,8470	0,0002	-4268322,2977	0,0002	-1453035,3504	0,0001
BRMU	2304703,5869	0,0004	-4874817,1735	0,0005	3395186,8863	0,0003
FORT	4985386,6331	0,0002	-3954998,5872	0,0002	-428426,4892	0,0001
BOGT	1744399,1047	0,0002	-6116037,8018	0,0002	512731,6208	0,0001
MANA	3179009,3860	0,0002	-5518662,1131	0,0002	-344401,8718	0,0001
BRAZ	4115014,0909	0,0002	-4550641,5294	0,0002	-1741444,0654	0,0001
CRO1	2607771,1862	0,0002	-5488076,8129	0,0002	1932767,6930	0,0001
GALA	-33796,0829	0,0002	-6377522,6442	0,0004	-82120,8976	0,0001
KOUR	3839591,4294	0,0002	-5059567,5468	0,0003	579956,9260	0,0001
OHIG	1525872,4873	0,0002	-2432481,3118	0,0002	-5676146,0903	0,0002
PARA	3763751,6454	0,0001	-4365113,7735	0,0002	-2724404,7350	0,0001
SANT	1769693,3471	0,0001	-5044574,1398	0,0002	-3468321,0430	0,0001
CUIB	3430711,4124	0,0002	-5099641,5475	0,0002	-1699432,9781	0,0001
VICO	4373283,3152	0,0002	-4059639,0201	0,0002	-2246959,7723	0,0001
LPGS	2780102,9760	0,0002	-4437418,8616	0,0002	-3629404,5845	0,0001
IMPZ	4289656,4739	0,0002	-4680884,9374	0,0003	-606347,3856	0,0002

TABELA 36 - VELOCIDADES E RESPECTIVOS DESVIOS PADRÃO.

ESTAÇÃO	$V_x$ (m/ano)	$\sigma_{vx}$ (m/ano)	$V_y$ (m/ano)	$\sigma_{vy}$ (m/ano)	$V_z$ (m/ano)	$\sigma_{vz}$ (m/ano)
AREQ	0,0044	0,00025	-0,0061	0,00011	0,0243	0,00021
UEPP	-0,0014	0,00021	-0,0103	0,00018	0,0176	0,00019
ASC1	-0,0006	0,00007	-0,0105	0,00026	0,0143	0,00022
BOMJ	-0,0019	0,00018	-0,0092	0,00019	0,0208	0,00020
BRMU	-0,0131	0,00048	0,0043	0,00026	0,0150	0,00021
FORT	-0,0039	0,00016	-0,0072	0,00021	0,0211	0,00020
BOGT	0,0002	0,00026	0,0017	0,00008	0,0192	0,00020
MANA	-0,0043	0,00023	-0,0040	0,00013	0,0234	0,00020
BRAZ	-0,0015	0,00020	-0,0089	0,00018	0,0196	0,00020
CRO1	-0,0016	0,00026	0,0058	0,00013	0,0186	0,00017
GALA	0,0168	0,00034	-0,0003	0,00000	0,0169	0,00022
KOUR	-0,0071	0,00023	-0,0028	0,00017	0,0223	0,00020
OHIG	0,0080	0,00025	-0,0051	0,00022	0,0043	0,00009
PARA	-0,0004	0,00021	-0,0119	0,00019	0,0184	0,00019
SANT	0,0020	0,00024	-0,0139	0,00015	0,0210	0,00017
CUIB	-0,0022	0,00023	-0,0081	0,00016	0,0199	0,00020
VICO	-0,0022	0,00020	-0,0126	0,00021	0,0183	0,00020
LPGS	-0,0002	0,00023	-0,0121	0,00018	0,0145	0,00017
IMPZ	-0,0042	0,00022	-0,0067	0,00020	0,0219	0,00022

Os resultados apresentados são satisfatórios dentro da técnica observacional aplicada com o uso do GPS. No processamento de um modo geral ocorreram poucos problemas relacionados aos dados das estações, mais ficou claro que a formação de linhas de base com extensão maior que 800 km em regiões próximas ao equador devem ser evitadas, pois a sua qualidade é inferior das demais, um exemplo disso são as linhas BRMU-FORT e GALA-MANA. Suspeita-se que este problema possa ser decorrente da intensa atividade ionosférica na região equatorial da Terra, pois em linhas de extensão equivalente, como por exemplo OHIG-PARA os resultados são melhores (vide GRÁFICO 5). Consequentemente, o mesmo ocorre com as coordenadas destas estações, como mostra a TABELA 34, dando um destaque para as estações com maiores erros em coordenadas.

### **5.6.3 Comparação das velocidades entre diversas fontes**

As tabelas 37 e 38 apresentam comparações feitas entre as diversas fontes onde foram obtidas velocidades para as estações envolvidas neste trabalho, com a solução final do trabalho. Os resultados nos modelos NNR-NUVEL-1A e APKIM8.8 foram calculados através do programa PLAMO3D, enquanto os valores da solução RNNAC SIR foram fornecidos pelo DGFI. As duas soluções ITRFyy foram obtidas na homepage do IERS. Os resultados finais tem uma concordância satisfatória com as outras fontes de comparação, principalmente no que se refere as estações localizadas no Brasil, por ser uma região da placa Sul-americana de baixa atividade sísmica, e não se localiza nos seus limites. Sendo assim, as velocidades de todas as estações, obtidas por diferentes modelos ou soluções geodésicas seguem direção e magnitude próximas. Entretanto, para as estações que ocupam regiões de deformação na placa Sul-americana, a solução estimada diverge bastante das outras fontes. Um exemplo deste fato ocorreu nas estações Santiago e Arequipa. Isto deve ser decorrente de problemas encontrados no processamento da estação Santiago, com grande ocorrência de perdas de ciclos em todas as épocas processadas. Os valores numéricos são apresentados na forma gráfica nas figuras 23 e 24. Analisando somente os resultados das velocidades estimadas neste trabalho, concluiu-se que as coordenadas de uma estação no Brasil variam em média cerca de 2 cm ao ano.

TABELA 37 - COMPONENTES DAS VELOCIDADES NO SISTEMA CARTESIANO,  
SEGUNDO OS MODELOS DE PLACAS NNR-NUVEL-1A E APKIM8.8 E  
RESULTADOS FORNECIDOS PELO DGFI NA SOLUÇÃO RNNAC SIR.

	NNR-NUVEL-1A			APKIM 8.80			RNAAC-SIR		
	Vx(m/ano)	Vy(m/ano)	Vz(m/ano)	Vx(m/ano)	Vy(m/ano)	Vz(m/ano)	Vx(m/ano)	Vy(m/ano)	Vz(m/ano)
AREQ	-0,0023	-0,0036	0,0090	-0,0024	-0,0050	0,0136	0,0067	-0,0035	0,0161
ASCI	0,0089	0,0248	0,0176	0,0088	0,0240	0,0183			
BOGT	-0,0061	-0,0010	0,0090	-0,0048	-0,0002	0,0140	-0,0131	0,0271	0,0124
BOMJ	-0,0015	-0,0054	0,0113	-0,0016	-0,0061	0,0129	-0,0025	-0,0194	0,0147
BRAZ	-0,0013	-0,0054	0,0110	-0,0016	-0,0064	0,0131	-0,0032	-0,0093	0,0124
BRMU	-0,0130	-0,0012	0,0070	-0,0117	-0,0009	0,0067			
CROI	0,0021	0,0045	0,0098	0,0069	0,0086	0,0150	-0,0056	0,0263	0,0095
CUIB	-0,0019	-0,0047	0,0105	-0,0020	-0,0058	0,0135	-0,0024	-0,0112	0,0155
FORT	-0,0028	-0,0048	0,0117	-0,0024	-0,0044	0,0127	-0,0054	-0,0102	0,0143
GALA	0,0714	-0,0012	0,0658	0,0377	-0,0004	0,0179	0,0457	-0,0015	0,0166
IMPZ	-0,0032	-0,0044	0,0114	-0,0027	-0,0042	0,0135	0,0075	-0,0229	0,0103
MANA	-0,0043	-0,0031	0,0105	-0,0035	-0,0029	0,0142	-0,0032	-0,0160	0,0207
KOUR	-0,0053	-0,0027	0,0111	-0,0041	-0,0015	0,0138	-0,0020	-0,0084	0,0165
LPGS	0,0016	-0,0062	0,0088	0,0003	-0,0093	0,0116	-0,0048	-0,0060	0,0121
OHIG	0,0187	0,0010	0,0046	0,0189	-0,0070	0,0081	0,0206	-0,0043	-0,0068
PARA	0,0003	-0,0061	0,0102	-0,0005	-0,0082	0,0124	-0,0041	-0,0159	0,0119
SANT	0,0009	-0,0051	0,0079	-0,0003	-0,0083	0,0119	0,0186	-0,0107	0,0114
UEPP	-0,0004	-0,0057	0,0104	-0,0010	-0,0074	0,0128	-0,0063	-0,0140	0,0119
VICO	-0,0001	-0,0061	0,0108	-0,0007	-0,0076	0,0123	-0,0090	-0,0140	0,0174

TABELA 38 - COMPONENTES DAS VELOCIDADES NO SISTEMA CARTESIANO,  
SEGUNDO SOLUÇÕES ITRF96 E ITRF97 E RESULTADOS  
FORNECIDOS PELA SOLUÇÃO FINAL DO TRABALHO.

	ITRF96			ITRF97			SOLUÇÃO FINAL - RBMC		
	Vx(m/ano)	Vy(m/ano)	Vz(m/ano)	Vx(m/ano)	Vy(m/ano)	Vz(m/ano)	Vx(m/ano)	Vy(m/ano)	Vz(m/ano)
AREQ	0,0114	0,0013	0,0123	0,0122	-0,0020	0,0100	0,0044	-0,0061	0,0243
ASCI	0,0032	-0,0002	0,0072	-0,0080	-0,0021	0,0066	-0,0006	-0,0105	0,0143
BOGT	0,0076	0,0034	0,0161	0,0067	0,0009	0,0130	0,0002	0,0017	0,0192
BOMJ							-0,0019	-0,0092	0,0208
BRAZ	-0,0089	0,0017	0,0115	-0,0085	0,0010	0,0098	-0,0015	-0,0089	0,0196
BRMU	-0,0113	-0,0030	0,0079	-0,0114	-0,0025	0,0056	-0,0131	0,0043	0,0150
CROI	0,0079	0,0085	0,0145	0,0093	0,0045	0,0106	-0,0016	0,0058	0,0186
CUIB							-0,0022	-0,0081	0,0199
FORT	0,0010	-0,0036	0,0114	-0,0006	-0,0047	0,0098	-0,0039	-0,0072	0,0211
GALA	0,0772	-0,0240	0,0191	0,0532	-0,0166	0,0147	0,0168	-0,0003	0,0169
IMPZ							-0,0042	-0,0067	0,0219
MANA							-0,0043	-0,0040	0,0234
KOUR	-0,0010	0,0001	0,0114	-0,0022	-0,0024	0,0103	-0,0071	-0,0028	0,0223
LPGS	0,0034	-0,0061	0,0080	-0,0020	-0,0037	0,0084	-0,0002	-0,0121	0,0145
OHIG	0,0179	0,0006	0,0025	0,0204	-0,0039	-0,0078	0,0080	-0,0051	0,0043
PARA							-0,0004	-0,0119	0,0184
SANT	0,0219	-0,0074	0,0070	0,0216	-0,0072	0,0069	0,0020	-0,0139	0,0210
UEPP							-0,0014	-0,0103	0,0176
VICO							-0,0022	-0,0126	0,0183



### Rede GPS - Calculo das velocidades - a priori ITRF96



FIGURA 23 - REPRESENTAÇÃO DOS VETORES DAS VELOCIDADES FINAIS COMPARADOS COM OS VETORES FORNECIDOS PELO MODELO NNR-NUVEL-1A E APKIM8.8.



FIGURA 24 - REPRESENTAÇÃO DOS VETORES DAS VELOCIDADES FINAIS COMPARADOS COM OS VETORES FORNECIDOS PELA SOLUÇÃO RNAAC-SIR E ITRF96.



#### 5.6.4 Variação temporal das linhas de base

Outra análise interessante fornecida pelo programa ADDNEQ é a variação na extensão de uma linha de base, segundo as velocidades das estações que a definem, representando a velocidade relativa entre as duas estações. Conforme apresentado na TABELA 39, as variações nas linhas de base em território brasileiro são em média inferiores a 2 mm ao ano, vindo a confirmar a estabilidade da placa SOAM na região ocupada pelo Brasil.

TABELA 39 - VARIAÇÃO DAS LINHAS DE BASE E RESPECTIVOS DESVIOS PADRÃO.

LINHA DE BASE	VARIAÇÃO DO COMPRIMENTO (m/ano)	DESVIO PADRÃO
AREQ - CUIB	-0,0071	0,00011
UEPP - BRAZ	0,0018	0,00004
ASC1 - BOMJ	-0,0017	0,00009
BOMJ - IMPZ	0,0005	0,00004
BRMU - FORT	-0,0020	0,00019
FORT - BOMJ	0,0000	0,00004
FORT - IMPZ	-0,0003	0,00009
BOGT - MANA	-0,0076	0,00011
MANA - CUIB	0,0025	0,00005
MANA - IMPZ	-0,0013	0,00010
BRAZ - BOMJ	0,0002	0,00004
BRAZ - VICO	-0,0017	0,00008
CRO1 - MANA	-0,0052	0,00011
GALA - MANA	-0,0218	0,00026
KOUR - FORT	-0,0001	0,00007
KOUR - IMPZ	0,0001	0,00005
PARA - UEPP	-0,0014	0,00003
SANT - UEPP	-0,0040	0,00007
CUIB - UEPP	0,0009	0,00004
LPGS - PARA	0,0025	0,00007
OHIG - PARA	0,0085	0,00012

#### 5.7.5 Vetores de rotação da placa SOAM segundo estações da RBMC

Conforme explicado na seção 5.2 deste trabalho, o movimento das placas litosféricas é dado segundo o movimento rotação de um vetor geocêntrico. Através do relacionamento  $V\vec{x} = (\vec{\Omega} \times \vec{X})\Delta t$ , realizado pelo programa PLAPEST<sup>13</sup> foram calculadas as componentes do

<sup>13</sup> Programa DOS que calcula o vetor de rotação ( $\Omega_x$ ,  $\Omega_y$  e  $\Omega_z$ ) de uma placa tectônica a partir das informações das velocidades referentes às estações da placa. Fonte: DGFI.

vetor de Euler, segundo os eixos X, Y, e Z para a placa SOAM conforme as velocidades fornecidas pelas estações brasileiras. A vantagem da utilização destes resultados está na fiel ou mais atual representação do movimento das estações em nosso território, ou seja na representação do campo de velocidades. Estes resultados poderiam substituir, por exemplo, os fornecidos no modelo NNR-NUVEL-1A segundo a placa SOAM. A TABELA 40 apresenta uma comparação dos valores de  $\Omega_x$ ,  $\Omega_y$  e  $\Omega_z$  segundo os modelos NNR-NUVEL-1A e APKIM8.80 com os valores calculados para o Brasil, obtidos a partir dos resultados fornecidos pelas 10 estações da RBMC. A TABELA 41 apresenta os mesmos valores em coordenadas esféricas do pólo e velocidade de rotação ( $\phi$ ,  $\Lambda$ ,  $\Omega$ ), verificando-se uma boa aproximação entre os parâmetros dos modelos em questão.

TABELA 40 - COMPARAÇÃO ENTRE OS VETORES DE ROTAÇÃO DA PLACA SOAM, SEGUNDO MODELOS: NNR-NUVEL-1A, APKIM8.8 E RESULTADOS DA RBMC.

\* m./anos = milhões de anos

MODELO	$\Omega_x$ (seg/m. anos)	$\Omega_y$ (seg/m. anos)	$\Omega_z$ (seg/m. anos)*
NNR-NUVEL-1A	-0,0595	-0,0868	-0,0498
APKIM8.80	-0,1161	-0,0536	-0,0401
RBMC	-0,1607	-0,0957	-0,0621

TABELA 41 - COMPARAÇÃO ENTRE OS PARÂMETROS DA PLACA SOAM SEGUNDO MODELOS NNR-NUVEL-1A, APKIM8.8 E RESULTADOS DA RBMC, TRANSFORMADO PARA COORDENADAS ESFÉRICAS.

MODELO	latitude (graus)	longitude (graus)	Vel. angular (graus/m. anos)
NNR-NUVEL-1A	-25,35	235,58	0,1164
APKIM8.80	-19,39	210,06	0,1268
RBMC	-18,38	210,78	0,1971

Os resultados obtidos neste trabalho são um primeiro ensaio na estimativa das velocidades através de observações GPS no Brasil, conduzindo assim, as seguintes conclusões:



- (1) A necessidade de se aplicar outros procedimentos no processamento GPS e na combinação das equações normais. Como por exemplo, realizar processamentos com injunções fracas (10 m ) nas soluções diárias e posteriormente combiná-las em uma solução de rede livre.
- (2) Gerar soluções de rede livre e rede injuncionada. Analisar qual delas forneceria melhor resultado.
- (3) A necessidade de se dispor de um período maior de observações GPS. Quanto mais longo for o período de observações GPS os resultados serão mais confiáveis. Alguns pesquisadores consideram o período de 5 anos apropriado para iniciar estudos de Geodinâmica [IBGE, 1997]. Sendo assim, pretende-se dar continuidade ao processamento as observações da RBMC.
- (4) Considerando os resultados obtidos neste capítulo através do processamento de 75 dias de observações GPS das estações da RBMC, conclui-se que os vetores velocidade nas estações da RBMC, possuem uma magnitude média de 2 cm ao ano.

## CAPÍTULO 6 - CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

O principal objetivo do presente trabalho, temporariamente finalizado, foi o desenvolvimento de procedimentos e metodologias necessárias para a integração do Sistema Geodésico Brasileiro ao SIRGAS, considerado atualmente um dos mais precisos sistemas geocêntricos de referência. A importância deste trabalho é evidenciada pela crescente necessidade da compatibilidade das informações referenciadas no contexto internacional e no atendimento aos padrões atuais de referenciamento. É importante ressaltar, a contribuição da RBMC nas pesquisas geodésicas desenvolvidas no Brasil. Em investigações como esta, fica claro que ela é a principal ferramenta de manutenção do SGB com os referenciais em uso pela comunidade internacional.

Resumidamente, as contribuições e avaliações obtidas neste trabalho de pesquisa foram:

1. Avaliação dos modelos do geopotencial OSU91A e EGM96 no território brasileiro, bem como a avaliação do modelo geoidal oficialmente em uso no Brasil com o EGM96;
2. Obtenção de coordenadas referidas ao SIRGAS para todas estações da rede geodésica de alta precisão;
3. Avaliação da precisão das coordenadas da rede geodésica de alta precisão;
4. Determinação de parâmetros de transformação SAD69 - 1996 e SIRGAS;
5. Avaliação das diferenças entre as materializações da rede geodésica, anos 1996 e 1998;
6. Obtenção das coordenadas e respectivos desvios padrão para as estações da RBMC e IGS (América do Sul);
7. Obtenção das velocidades e respectivos desvios padrão para as estações da RBMC e IGS (América do Sul);
8. Comparação dos resultados obtidos neste trabalho (processamento RBMC e IGS) com modelo geofísico de tectônica de placas (NNR-NUVEL-1A), modelo geodésico (APKIM8.80) e outras soluções geodésicas (ITRF96, ITRF97 e RNNAC-SIR);
9. Avaliação da variação temporal das linhas de base em território brasileiro, visando a

variação temporal intra-placa;

10. Obtenção de vetores de rotação da placa SOAM, segundo estações da RBMC (solução deste trabalho).

Cabem aqui algumas considerações sobre os resultados obtidos nos capítulos 3, 4 e 5. No que se refere ao capítulo 3, a utilização do modelo EGM96 é uma solução provisória, considerando a necessidade do desenvolvimento de um novo modelo geoidal mais preciso para o Brasil e compatível com um sistema geocêntrico. Um modelo geoidal sempre deverá estar acompanhado das estruturas geodésicas estabelecidas por GPS e conseqüentemente dos novos sistemas de referência concebidos através desta técnica.

Referente ao capítulo 4, são feitas as seguintes recomendações aos usuários de GPS que precisam integrar novos levantamentos ao SAD69 que fizerem uso do procedimento de integração empregado neste trabalho:

1. Verificar se os novos levantamentos estão em uma área onde exista a materialização do SAD69 - 1996. A utilização deste procedimento se aplica somente em áreas onde as duas materializações estejam presentes, como por exemplo, no caso da região Amazônica este procedimento não poderá ser aplicado.
2. Avaliar as distorções na área de trabalho, através de plotagens dos vetores de diferenças em coordenadas;
3. Aplicar metodologia apropriada para transformação dos dados: ESTPM ou somente a aplicação de parâmetros de transformação. Se a distorção na área é muito pequena, uma transformação local talvez seja a alternativa mais adequada, preservando a integridade das observações GPS, enquanto se tem um razoável relacionamento com os levantamentos originais.

A mudança de referencial regional – SAD69 para o referencial geocêntrico - SIRGAS

afetará as coordenadas que materializam o SGB em aproximadamente 65 metros. Para o mapeamento sistemático, estas diferenças são traduzidas na TABELA 42, segundo a escala da carta.

TABELA 42 - EFEITO DA MUDANÇA DE COORDENADAS - 65 METROS, EM DIFERENTES ESCALAS DO MAPEAMENTO SISTEMÁTICO.

ESCALA 1:	Deslocamento em mm
1000000	0,065
500000	0,13
250000	0,26
100000	0,65
50000	1,30
25000	2,60

O capítulo 5 foi dedicado especificamente no estabelecimento de velocidades para que seja preservada a consistência do SGB (integrado ao SIRGAS), com os sistemas de referência internacionais – ITRFyy. As velocidades estimadas são, neste caso, derivadas de sucessivas determinações de coordenadas obtidas por GPS. No Brasil, o monitoramento das coordenadas das estações SIRGAS é feito através do processamento diário dos dados GPS da RBMC. Os resultados comprovam que o fato do Brasil não ocupar regiões que envolvem os limites da placa SOAM ou até mesmo do território não estar em duas placas distintas, não configuram variações nas coordenadas das estações ou na extensão das linhas de base que necessitem de freqüentes atualizações. A variação média de 2 cm ao ano, induziria a uma revisão das coordenadas SIRGAS a cada 5 anos, visando a manutenção da precisão geodésica alcançada hoje em dia (0,1 m ou melhor). Uma alternativa no acompanhamento das coordenadas SIRGAS seria o fornecimento de um programa (ex. TRNOBS) que atualizasse as coordenadas das estações conforme parâmetros da placa SOAM estimados através de resultados da RBMC, não necessitando assim, uma atualização periódica no banco de dados geodésicos. Através destes resultados, a RBMC vem revelando a sua importante contribuição para os trabalhos geodésicos no Brasil, confirmando assim, a resposta satisfatória fornecida pela técnica GPS em investigações como esta.

Conclui-se também que a estimativa do campo de velocidades através de técnicas espaciais geodésicas depende do período de tempo e do espaçamento destas observações dentro deste período. Muitos pesquisadores (ex: LARSON et al. [1997] e IBGE [1997]), sugerem que se trabalhe com um período mínimo de 5 anos. Considerando a ausência de um computador no IBGE ou UFPR capaz de processar a extensa quantidade de dados GPS proposta neste trabalho, optou-se por processá-los no DGFI (Alemanha), necessitando então, que o período de tempo fosse reduzido para dois anos. Apesar disso, os resultados apresentados neste trabalho estão coerentes com as diversas fontes utilizadas para comparação (NNR-NUVEL-1A, APKIM 8.80, RNNAC SIR e ITRF96). Fica aqui, como sugestão para trabalhos futuros, o prosseguimento do processamento dos dados da RBMC, visando a obtenção de velocidades cada vez mais confiáveis.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ARGUS, D.F; GORDON, R.G.. **No-net-rotation model of current plate velocities incorporating plate motion model NUVEL-1**. Geophysical Research Letters, Vol. 18, n° 11, pp. 2039-2042, 1991.
- BEATTIE, D.S.. **Program GHOST User Documentation**, Geodetic Survey of Canada, Ottawa, 1987.
- BLITZKOW, D. et al.. **Mapa Geoidal do Brasil – 1992**. IBGE/EPUSP-PTR, Rio de Janeiro, 1992.
- BOUCHER, C. & ALTAMINI, Z.. **Evolution of the Realization of the Terrestrial Reference System – IERS Technical Note 4**, IERS/CB, Paris, 1990.
- BOUCHER, C. & ALTAMINI, Z.. **ITRF90 and other Realizations of the IERS Terrestrial Reference System for 1989 – IERS Technical Note 6**, IERS/CB, Paris, 1991.
- BOUCHER, C.; ALTAMINI, Z.. **International Terrestrial Reference Frame**. GPS WORLD, setembro, 1996.
- BOUCHER, C.; ALTAMINI, Z.; SILLARD, P.. **The ITRF96 Realization of the International Terrestrial Reference System**, Institute Géographique National(ENSG/LAREG). IAG97, Rio de Janeiro, 1997.
- CADESS, H. et al.. **Inter American Geodetic Integration**. PAIGH , 1991.
- CASTAÑEDA, R.M.. **Ensaio para Definição de Parâmetros de transformação entre o SAD69 e NSWC 9Z2**. Universidade Federal do Paraná, dissertação de mestrado, 1986.
- COLLIER, P.A.; ARGESSEANU, V.S.; LEAHY, F.J.. **Distortion Modelling and the Transition to GDA94**. The Australian Surveyor, vol. 43, n° 1, 1998.
- COSTA, S.M.; FORTES L.P.S.. **Resultados Preliminares do Ajustamento da Rede Planimétrica do Sistema Geodésico Brasileiro**, Rio de Janeiro, 1993.
- COSTA, S.M.; BEATTIE, D.; PEREIRA, K.D.P.. **The Integration of Brazilian Geodetic Network into SIRGAS- Preliminary Results**. IGGOS, Munique, 1998.
- COSTA, M.F.; **Compatibilização entre Realizações dos Referenciais Geodésicos**, dissertação de mestrado, Curso de Pós-graduação em Ciências Geodésicas, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 1999.

- CRAYMER M.R.. **Integration of Local Surveys into the Canadian Spatial Reference System**. Geodetic Survey Division, Geomatics Canada, fevereiro, 1998.
- DEMELTS, C. et al.. **Current plate motions**. Geophysical Journal Int., n° 101, pp. 425-478, 1990.
- DEMELTS, C. et al.. **Effect of recent revisions to the geomagnetic reversal time scale on estimates of current plate motions**. Geophysical Research Letters, vol. 21, n° 20, pp. 2191-2194, 1994.
- DENYS, P., CROSS, P.. **The Role of IGS and ITRF Data Products in the Definition and Maintenance of National Coordinate Systems**. Department of Surveying, University of Otago, 1995.
- DGFI - DEUTSCHES GEODÄTISCHES FORSCHUNGSIINSTITUT ABT.I. **Earth's Surface Geometry and Terrestrial Reference Systems**. <http://dgfi2.dgfi.badw-muenchen.de/~geodis/geometry.html>, 1998a.
- DGFI - DEUTSCHES GEODÄTISCHES FORSCHUNGSIINSTITUT ABT.I. **REGIONAL NETWORKS – CASA**. <http://www.dgfi.badw-muenchen.de/gps/casa.html>, 1998b.
- DGFI - DEUTSCHES GEODÄTISCHES FORSCHUNGSIINSTITUT ABT.I. **REGIONAL NETWORKS - SIRGAS**. <http://www.dgfi.badw-muenchen.de/gps/sirgas.html>, 1998c.
- DMA – DEFENSE MAPPING AGENCY. **Department of Defense - World Geodetic System 1984**, DMA TR 8350.2, segunda edição, 1991.
- DREWES, H.. **A Geodetic Approach for the Recovery of Global Kinematic Plate Parameters**, *Bulletin Geodesique*, n°56, pp. 70-79, 1982.
- DREWES, H.. **Global and Regional Deformation Models of the Earth's Surface**. Proceedings of the International Conference on Cartography and Geodesy, Maracaibo, 1993.
- DREWES, H.. **Combined VLBI, SLR and GPS Analysis for Actual Plate Kinematic and Crustal Deformation Models**. IAG97, Rio de Janeiro, 1997a.
- DREWES, H.. **Time Evolution of the SIRGAS Reference Frame**. IAG97, Rio de Janeiro, 1997b.

- FISCHER, I.. **The Basic Framework of the South American Datum of 1969**. XII Pan American Cosultation on Cartography, Panamá, 1973.
- FORTES, L.P.S; CAGNIN, I.F.; GODOY, R. A. Z.; BLITZKOW, D.. **Determinação dos parâmetros de transformação entre os sistemas NWL-10D, NSWC9Z2, WGS84 e o SAD69**. anais do XIV CBC, vol. I, pp.157-165, Gramado, 1989.
- FORTES, L.P.S.. **Operacionalização da Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo do Sistema GPS (RBMC)**. dissertação de mestrado, IME, Rio de Janeiro, 1997.
- GEMAEL, C.. **Introdução ao Ajustamento de Observações: Aplicações Geodésicas**. ed. Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 1994.
- GODOY, R.D. et al.. **Reprocessamento de estações DOPPLER**. trabalho apresentado no XV Congresso Brasileiro de Cartografia, São Paulo, 1991a.
- GODOY, R.D. et al.. **Translocação na Amazônia**. trabalho apresentado no XV Congresso Brasileiro de Cartografia, São Paulo, 1991b.
- GREGORIUS, T.. **Gipsy-Oasis II – How it works**. Department of Geomatics, University of Newcastle upon Tyne, 1996.
- GSD - Geodetic Survey Division. **Accuracy Standards for Positioning - version 1.0**: Geomatics Canada, Ottawa, 1996.
- GSD - Geodetic Survey Division, **GPS Positioning Guide – A user's guide to the Global Positioning System**, 1995.
- HELMERT, F.R.. **Die Mathematischen und Physikalischen Theorien der Höheren Geodäsie**, Leipzig, 1880.
- IBGE - Fundação Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Especificações e Normas Gerais para levantamentos GPS**, Rio de Janeiro, 1992.
- IBGE - Fundação Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, **Especificações e Normas Gerais para Levantamentos Geodésicos em Território Brasileiro**. RPR n 22/83, Boletim de Serviço 1602(Suplemento), Rio de Janeiro, 1983.
- IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Ajustamento da Rede Planimétrica do Sistema Geodésico Brasileiro - Relatório**, Rio de Janeiro, 1996.
- IBGE- Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **SIRGAS - Relatório Final**, IAG97 Rio de Janeiro, 1997.



- IERS – International Earth Rotation Service. ITRF Solutions, <http://lareg.ensg.ign.fr/ITRF/>, 1998.
- IGeS – International Geoid Service. **Bulletin n° 6**, Milano, 1997.
- JUNKINS, D. R.. **The National Transformation for converting between NAD27 and NAD83 in Canada**. Geodetic Survey Division, Geomatics Canada, Ottawa, 1990.
- JUNKINS, D. R.. **Transforming to NAD83**. Geodetic Survey Division, Geomatics Canada, Ottawa.
- JUNKINS, D.R., ERICKSON C.. **Version2 of the National Transformation between NAD27 and NAD83 and It's Importante for GPS positioning in Canada**. Geodetic Survey Division, Geomatics Canada, Ottawa, 1996.
- KOUBA, J.; POPELAR, J.. **Modern Geodetic Reference Frames for Precise Satellite Positioning and Navigation**. Geodetic Survey Division, Geomatics Canada, Ottawa, 1995.
- KOUBA, J.. **ITRF96 IGS Product Change – IGS Eletronic Mail n°1838**, março, 1998.
- LARSON, K.M.; FREYMUELLER, J.T.; PHILIPSEN, S.. **Global Plate Velocities from Global Positioning System**. Journal of Geophysical Research, vol. 102, n°B5, pp. 9961-9981, 1997.
- LUGNANI, J.B.. **Introdução à Fototriangulação**, Curitiba, 134 p, 1987.
- MALYS, S.; SLATER J.. **Maintenance and Ennhancement of the World Geodetic System 1984**, Proceedings of ION-94, The Seventh International Technical Meeting of the Satellite Division of the Institute of Navigation, Salt Lake City, pp. 17-24, 1994.
- MCCARTHY, D.D.. **IERS Technical Note 13 - IERS Standards**. Observatoire de Paris, Paris, 1992.
- MCCARTHY, D.D.. **IERS Technical Note 21 - IERS Conventions (1996)**. U.S. Naval Observatory, 1996.
- NIMA - National Imagery and Mapping Agency, **Department of Defense World Geodetic System 1984**, NIMA TR 8350.2, Third Edition, 171p., 1997.
- NOAA Professional Paper NOS 2, **North American Datum of 1983**, National Geodetic Survey, 1989.

- OLIVEIRA, L. C.. **Realizações do Sistema Geodésico Brasileiro associadas ao SAD69. Uma proposta metodológica de transformação.** Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, tese de doutorado, São Paulo, 1998.
- PAVLIS, N. K.. **Development and Applications of Geopotential Models.** Escola do Geóide, 1997.
- PEREIRA, K.D.. **Rede Nacional GPS.** trabalho apresentado no XVI Congresso Brasileiro de Cartografia, Rio de Janeiro, 1993.
- PESSOA, L.M.C.. **Geóide Gravimétrico Local em Área da Bacia do Paraná,** dissertação de mestrado, Curso de pós-graduação em Ciências Geodésicas, Curitiba, 1997.
- PINCH, M.C.. **North American Geodetic Network Adjustment – The Transition from NAD27 to NAD83.** Geodetic Survey Division, Geomatics Canada Centre, Canada, 1986.
- RAPP, H.R.. **The Use of Potential Coefficient Models in Computing Geoid Undulations.** Department of Geodetic Science and Surveying, The Ohio State University, 1991.
- ROTHACHER, M.; MERVART L.. **Bernese GPS Software Version 4.0.** Astronomical Institute University of Berne, Berne, 1996.
- SEEMÜLLER, W.; DREWES H.. **The IGS Regional Network Associate Analysis Center for South America at DGFII.** IAG97, Rio de Janeiro, 1997.
- SILLARD, P. et al.. **The ITRF96 realization and its associated Velocity field.** Geophysical Research Letters, vol. 25, n° 17, pp. 3223 – 3226, 1998.
- SILVA, M.V.D.. **O Projeto de Reajustamento da Rede Geodésica Planimétrica Nacional.** XII Congresso Brasileiro de Cartografia, Brasília, 1985.
- SOLER, T.. **A compendium of transformation formulas useful in GPS work.** National Geodetic Survey, Journal of Geodesy, n° 72, pp. 482-490, 1998.
- STEEVES, R.S.. **Mathematical Models for use in the Readjustment of the North American Geodetic Networks.** Geodetic Survey Division, Geomatics Canada, 1984.
- SWIFT, E.. **Improved WGS84 Coordinates for DMA and Air Force GPS Tracking Sites, Proceedings of ION-94.** The Seventh International Technical Meeting of the Satellite Division of the Institute of Navigation, Salt Lake City, 1994 , pp.285-292.
- TCHERNING, C.C.; RAPP, R.H.; GOAD, C.. **A Comparison of Methods for**

**Computing Gravimetric quantities from High Degree Spherical Harmonic Expansions, Manuscripta Geodaetica.** vol.B, pp. 249-272, 1983.

- TORGE, W, The International Association of Geodesy (IAG) – More Than 130 years of International Cooperation, *Journal of Geodesy - The Geodesist's Handbook* - volume 70 – número 12 – outubro 1996 – pp.842-843.
- VANICEK, P.; KRAKIWSKY, E. J.. **Geodesy: the Concepts.** 2° edition, North Holland Publishing, 1986.
- VANICEK, P.; STEEVES, R.R.. **Transformation of Coordinates between Two Horizontal Geodetic Datums.** *Journal of Geodesy*, vol.80, pp. 740-745, 1996.
- VINCENTY, T.. Height-controlled three-dimensional Adjustment of Horizontal Networks. *Bulletin Géodésique* 54, pp.37-43, 1980

## ANEXO A

### EXEMPLOS DA APLICAÇÃO DA MODELAGEM DE TRANSFORMAÇÕES NA REDUÇÃO DE COORDENADAS

Apresenta-se nesta seção, dois exemplos práticos de transformações entre sistemas geocêntricos terrestres:

(a) Sejam observações GPS nas estações  $X_j$  realizadas em  $t =$  setembro de 1998.

- Sistema de referência das órbitas dos satélites é ITRF96 ( $t = 1998,7$ );
- Sistema de referência das estações de ligação  $X_i$  é SIRGAS, ou seja, ITRF94 época 1995,4. Então  $\text{SIRGAS} = \text{ITRF94}$  ( $t_0 = 1995,4$ ).

As transformações necessárias são:

1. Redução das coordenadas SIRGAS para a época das observações GPS:

$$X_i(t) = X_i(t_0) + v \cdot (t - t_0)$$

$$X_i(1998,7) = X_i(1995,4) + v \cdot (1998,7 - 1995,4)$$

2. Transformação pela mudança de sistema ITRF (ITRF94=>ITRF96). Transformação de similaridade:

$$X_i (\text{ITRF96}) = T + [R] X_i (\text{ITRF94})$$

Observação: neste exemplo esta transformação não será aplicada pois não existem parâmetros oficiais divulgados pelo IERS.

3. Processamento e ajuste das coordenadas  $X_j$  em ITRF96 época 1998,7:
4. Transformação dos resultados do ajuste para ITRF94 :

$$X_j (\text{ITRF94}) = T + [R] X_j (\text{ITRF96})$$

5. Redução das novas coordenadas  $X_j$  para a época SIRGAS:

$$X_j (1995,4) = X_j (t) - v \cdot (1998,7 - 1995,4)$$

(b) Seja a estação  $i$  com coordenadas definidas na época  $t =$  setembro de 1998, pretende-se transformá-las para ITRF92 época  $t_k = 1992,2$ .

- O ITRF realizado para época  $t = 1998,7$  é ITRF96
- A época da realização do ITRF92 é  $t_0 = 1988,0$

As transformações necessárias são:

6. Redução das coordenadas do ponto  $i$  para época  $t_0$  :

$$X_i (t_0) = X_i (t) + v \cdot (t - t_0)$$

$$X_i (1988,0) = X_i (1998,7) + v \cdot (1998,7 - 1988,0)$$

7. Transformação pela mudança de sistema ITRF (ITRF96 → ITRF92). Transformação de similaridade:

$$X_i (\text{ITRF92}) = T + [R] X_i (\text{ITRF96})$$

8. Transformação das novas coordenadas de  $i$  para a época  $t_k$ :

$$X_i (t_k) = X_i (t_0) + v \cdot (1988,0 - 1992,2)$$

## ANEXO B

### PRINCIPAIS ESTRATÉGIAS E OPÇÕES ADOTADAS NOS PROCESSAMENTOS DIÁRIOS DA RBMC

Arco de órbita	Para cada dia de processamento foi definido um arco de órbita com dados relativos a 24 horas .
Observáveis primárias	Fase da portadora L1 e L2, as medições de código foram utilizadas

	para a sincronização do relógio do receptor .
Observáveis Modeladas	As duplas diferenças de fase foram modeladas na combinação linear de L1 e L2 livre dos efeitos ionosféricos, denominada no software de L3.
Correção das Perdas de ciclos	Processamento da fase em L3 no modo COMBINADO <sup>1</sup> usando as triplas diferenças na detecção das perdas de ciclos. Nos casos em que não foi possível fixar as perdas de ciclos, os dados são removidos do processamento e novas ambigüidades são estimadas.
Ângulo de elevação	Maior que 10°
Intervalo de registro	Em todas as etapas do processamento foi utilizado 30 segundos
Modo de processamento	Sessão de 24 horas (todas as estações são processadas simultaneamente) no modo CORRECT <sup>2</sup> , isso significa que as correlações matemáticas entre observações de dupla diferenças são mantidas, mesmo em um processamento em sessão (várias linhas de base processadas simultaneamente).
Opção para montagem das simples diferenças	MANUAL (linhas de base montadas entre estações IGS e RBMC)
Ionosfera	Não foi modelada porque seus efeitos são eliminados mediante a combinação linear (L3) das portadoras (L1 e L2).
Troposfera	O atraso dos sinais produzidos pelo efeito da troposfera, foram modelados <i>a priori</i> mediante ao modelo Saastamoinen, com parâmetros meteorológicos de uma atmosfera padrão. Esta estimativa <i>a priori</i> do atraso dos sinais foi somada as correções dos atrasos zenitais utilizando a função de mapeamento Niell. No processamento das sessões foi calculado um parâmetro troposférico a cada 2 horas, ou seja 12 correções em períodos de 24 horas.
Correção do centro de fase da antena do receptor	Os deslocamentos do centro de fase da antena são valores recomendados pelo IGS, dependendo da combinação antena/receptor utilizada na observação. Arquivo : IGS_PHAS.

<sup>1</sup> Esta opção significa que a combinação linear de L1 e L2 livre dos efeitos ionosféricos é usada para a detecção de perdas de ciclos (em linhas de base maiores que 10 km).

<sup>2</sup> O que significa produzir na solução do processamento uma MVC completa.

Ambigüidades	Foi utilizada a estratégia Quasi-Ionosphere-Free (QIF) <sup>3</sup> a qual permite a resolução das ambigüidades nas observáveis L1 e L2 em linhas de base de grandes extensões.
Orientação terrestre	Foram adotadas soluções compatíveis com as órbitas IGS, segundo os arquivos ERP (Earth Rotation Parameters)
Solução final diária	Processamento de Rede Injuncionada, o qual consiste em adotar ponderações para determinadas estações, denominadas de referência. No processamento final do GPSEST foram utilizadas como referência, as 7 estações IGS (solução ITRF96): AREQ, ASC1, BOGT, CRO1, KOUR, SANT e LPGS.
Saídas geradas em cada solução diária	Coordenadas das estações e respectivas equações normais.
Solução final de cada época	Combinação das equações normais, através de um ajustamento injuncionado por mínimos quadrados. Foram usadas como referência as 7 estações IGS. Sendo neste caso atribuído uma ponderação maior dos que os desvios padrão fornecidos pela solução ITRF96.
Critério de rejeição	Não houve critério de rejeição no processamento, apenas em algumas linhas de base com comportamento inferior das demais foram eliminados os resíduos altos no processamento e novas ambigüidades foram estimadas. Na maioria dos casos essas linhas estavam na região equatorial da Terra.

---

<sup>3</sup> O software bernese possui 4 algoritmos de resolução de ambigüidades. Cada algoritmo usa uma combinação linear diferente de L1 e L2.